

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)
Отдел образовательной деятельности

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах
научно-квалификационной работы на тему:

«Влияние режимов лазерного облучения и схемы подключения на
наносекундные коммутационные характеристики фотопроводящего
полупроводникового коммутатора из арсенида галлия»

Направление подготовки:

03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (научная специальность):

1.3.5 Физическая электроника

Аспирант



Бармин Валерий Владимирович

Научный руководитель:

Романченко Илья Викторович

д.ф.-м.н., г.н.с. ИСЭ СО РАН

Томск – 2024

Актуальность работы

Разработки мощных наносекундных полупроводниковых коммутаторов, позволяют заменить применение газовых разрядников. Одной из разработок является фотопроводящий полупроводниковый коммутатор с высоким коэффициентом усиления (ФППК) или по английски HG PCSS. ФППК с большим усилением работает на эффекте "Lock-On" или "Эффект залипания проводимости" [1-3]. Эффект заключается в поддержании проводящего состояния HG PCSS с помощью приложенного внешнего поля после воздействия внешнего оптического излучения. Электрическое поле и мощность оптического импульса имеют пороговые значения. Например, для GaAs:EL2 пороговое значение внешнего поля должно превышать ~ 4 кВ/см; для GaAs:Cr пороговое поле составляет $\sim 8,5$ кВ/см [4, 5], а для InP:Fe - более 14 кВ/см [5]. С большой долей вероятности, механизм этого эффекта основан на нелинейном эффекте генерации электронно-дырочной плазмы в условиях лавинного пробоя, который был изучен на лавинном биполярном транзисторе и получил название CFD (Collapsing Field Domain) [6-8]. Этот механизм позволяет получить преобразование оптической мощности в электрическую с большим коэффициентом при длительности переключения, меньшей, чем длительность фронта оптического импульса и за время меньшее чем время пролета частица через структуру в режиме насыщения. При сверхбыстром переключении PCSS происходит формирование канала проводимости с высокой плотностью тока - нити накала (более 10^6 А/см²).

Конструкция ФППК основана на p-i-n структуре. Размеры области "i" определяют максимальное рабочее напряжение выключателя. Преимуществом таких конструкций является отсутствие ограничений на рабочее напряжение при обеспечении соответствующей изоляции поверхности и технологических возможностей. Основными факторами, определяющими этот эффект, являются материал ФППК, приложенное внешнее поле и параметры оптического импульса. Важным параметром

оптического импульса является энергия квантов. Согласно спектральной зависимости светочувствительности GaAs:Cr в диапазоне 850-1550 нм светочувствительность больше 1, что указывает на то, что величина фототока превышает значения темнового тока [9]. Существуют также локальные максимумы при 920 и 1300 нм с светочувствительностью около 100, что является еще одной причиной выбора длины волны 1064 нм (1,17 эВ) вблизи локального максимума. Светочувствительность в ИК-области объясняется фотоэлектрическим эффектом в глубоких центрах EL2 и HL1, хвосте плотности состояний. При подаче зарядного напряжения на ФППК добавляется эффект Франца–Келдыша, что подтверждается практической работой с PCSS на основе GaAs-переключаемого излучения с длиной волны 1064 нм [2, 9]. Спектральные распределения квантовой эффективности при 355 нм (3,5 эВ) для GaAs с напряжением смещения 10 В и без него в видимом и УФ-диапазоне [9] показывают, что квантовая эффективность при 3,5 эВ в отсутствие напряжения составляет ~2 а при напряжении 10 В составляет ~20. Когда энергия кванта при приложенном напряжении (10 В) меньше ~3,5 эВ, наблюдается сильное снижение квантовой эффективности, в том числе для 532 и 633 нм. Этот факт определяет выбор длины волны 355 нм. Результаты воздействия разной энергией кванта важны поскольку определяют ресурс подобных коммутаторов, а также внутреннее сопротивление в проводящем состоянии.

Другим эффективным решением, оказывающим влияние на ресурс ФППК является облучение коммутатора с помощью матрицы лазерных диодов и передачей лазерного излучения к коммутатору через 12 каналов из оптоволокну. Такой тип запуска показал увеличение тока в выходном импульсе с малым джиттером срабатывания по сравнению с коммутацией одним лазерным пучком, вследствие сложения нескольких филаментов сформированных по пути минимального сопротивления на поверхности кристалла под действием дефектов в кристалле и внешнего электрического

поля [10]. После проверки возможности распределения филаментов, следующим шагом повышения ресурса коммутатора стала возможность одновременной коммутаций 48 ФППК диаметром 2" с помощью 8 лазеров с длиной волны 532 нм, с делением лазерного пучка на 200 каналов с помощью оптоволоконных воздействующих на 6 коммутаторов. В результате облучения PCSS таким методом, получилось сформировать 1600 филаментов с ресурсом более 10^7 срабатываний, что превышает ресурс одного газового разрядника с аналогичными электрическими параметрами коммутаций [11].

Применение параллельного-последовательного соединения коммутаторов вместе с мультифиламентным режимом позволяет создавать надежные модуляторы и ускорители мегаваттной мощности в достаточно компактных размерах [12]. Подобные полупроводниковые коммутаторы могут частично решить проблемы с ресурсом, джиттером, частотой срабатывания и предельным напряжением, поэтому так важно определить, воздействие на параметры ФППК для получения высоковольтного коммутатора в выдающимися характеристиками.

Целью работы является определение предельных коммутационных характеристик в наносекундном диапазоне для фотопроводящего полупроводникового коммутатора (ФППК) в различных режимах лазерного облучения и при различных схемотехнических решениях.

Задачи исследования:

1. Обзор научных работ, описывающих принципы и способы коммутаций ФППК с достижением наименьшего внутреннего сопротивления и наибольшего ресурса.

2. Определение внутреннего сопротивления и параметров выходного импульса и ресурса в некоторых случаях при коммутации ФППК в однофиламентном, мультифиламентном режиме, при разных энергиях квантов лазерного излучения и при параллельном включении с приложенным

импульсным напряжением от 8 кВ до 30 кВ а так же с разовой и частотной коммутацией до 10 Гц. Создание необходимого модулятора под данные эксперименты.

Методы исследования

Основными методами исследования в настоящей работе являются теоретический расчет, а также физический эксперимент. Теоретический расчет использован для определения напряженности электрического поля и согласование волноводных элементов в наносекундном диапазоне в CST Microwave Studio при использовании техники конечного интегрирования (FIT) основанной на использовании уравнений Максвелла в интегральной форме к набору расположенных в шахматном порядке сеток. По ходу применения данных методов, выполнены следующие операции:

1. Расчет S параметров и ЭМ полей волноводной камеры для регистраций параметров ФППК;
2. Изготовление источника импульсного напряжения под параметры экспериментов;
3. Измерение S параметров волноводной камеры в металле;
4. Измерение распределения оптической энергий лазерного пучка;
5. Оценка размеров интерференционной картины от интерферометра Майкельсона;

Научные положения, сформулированные на основе результатов исследования

1. Наличие оксидного слоя SiO_2 при воздействии УФ излучения (355 нм) на поверхность кристалла фотопроводящего полупроводникового коммутатора на основе GaAs приводит к отражению флюоресцирующего

излучения (≈ 900 нм) и соответственно увеличивает внутреннее сопротивление в проводящем состоянии и снижает требуемое для коммутации электрическое поле по сравнению с результатами этого же коммутатора со стравленным оксидным слоем.

2. Увеличение энергии кванта лазерного излучения инициирующего включения коммутатора с 1,17 эВ до 3,5 эВ позволяет обеспечить увеличение плотности тока в филаменте в 3 раза и уменьшить пороговую энергию включения в 14 раз.

3. В результате расчета электродинамических характеристик волновой камеры с двумя ФППК продемонстрировано взаимное экранирование полей кристаллов проводящих областей, что значительно улучшает согласование, в камере, имеющей отверстие для ввода лазерного излучения.

4. Увеличение проводящих каналов до 4 в кристалле фотопроводящего полупроводникового переключателя снижает длительность фронта выходного импульса в 5,6 раз как в единичном коммутаторе, так и при параллельном включении ФППК образующих два канала 4,5 раза.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

1. Обоснованность полученных результатов по **первому** положению основывается на использовании стандартных методике измерения выходного импульса, а также разницу внутреннего сопротивления от условия коммутаций превышающее в 10 раз.

2. Обоснованность полученных результатов по **второму** положению основывается на применении стандартных методов измерения с помощью сертифицированных устройств для измерения как оптических параметров с усреднением по 100 импульсам, так и электрических.

3. Обоснованность полученных результатов по **третьему** положению основывается на применении коммерческой среды расчета ЭМ полей в частотном диапазоне, а также практическими измерениями параметров

рассеяния на сертифицированном ВАЦ по методике рекомендованной производителем.

4. Обоснованность полученных результатов по **четвёртому** положению основывается на измерениях по стандартным методикам электрических и оптических параметров как в п.2.

Научная новизна

1. Обнаружено влияние микронного слоя SiO_2 на поверхности кристалла фотопроводящего полупроводникового коммутатора на основе GaAs на увеличении внутреннего сопротивления в проводящем состоянии и снижает необходимую напряженность поля для коммутаций по сравнению с результатами этого же коммутатора со стравленным оксидным слоем.

2. Установлено что увеличение энергии кванта лазерного излучения с 1,17 эВ до 3,5 эВ позволяет обеспечить при коммутации формирование филаментов с плотностью тока в филаменте в 3 раза больше при меньшей длительности оптического импульса в 2,3 раза и меньшей оптической энергией в 14 раз.

3. Предложен метод повышения согласования волноводной камеры коаксиальной конструкций с отверстием путем вытеснения поля на периферию камеры за счет кулоновского взаимодействия между проводящими областями двух центральных проводников, включенных параллельно.

4. Зафиксировано укорочение фронта выходного импульса и как следствие уменьшение индуктивности ФППК от количества проводящих каналов, как и в одном ключе так и при параллельном включении двух ФППК работающих в одноканальном режиме.

Практическая значимость

1. Определён фактор влияния защитного слоя из SiO_2 от поверхностного пробоя на параметры коммутаций ФППК.

2. Получена зависимость влияния энергий кванта на внутреннее сопротивление ФППК при выборе параметров запускающего лазерного излучения.

3. Определен метод повышения согласования коаксиальных волноводов, в которых присутствуют отверстия.

4. Продемонстрирована возможность повышения ресурса ФППК от количества проводящих каналов, как и в одном ключе так и в параллельном включении при использовании их в высоковольтных устройствах.

Апробация результатов работы

1. 8-й Международный конгресс «Потоки энергии и радиационные эффекты» (8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, EFRE 2022 (2 – 8 октября, 2022 г.)), Томск, Россия;

2. 24-я Международная конференция «молодых профессионалов электронных устройств и материалов» (IEEE 24nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) EDM 2023 (29 июня- 3 июля, 2023г.)), Горно-Алтайск, Россия;

3. 16-я Всероссийская школа «по лазерной физике и лазерным технологиям» (18 – 22 сентября, 2023 г.), Саров, Россия.

4. Школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем - 2024» (24 – 26 апреля, 2024 г.), Новосибирск, Россия.

Личный вклад автора

Представленные в работе результаты получены лично автором, а также при совместной работе с соавторами публикаций: Романченко И.В. Коневым В.Ю и Пучикиным А.В. Постановка задач осуществлялась научным руководителем И.В. Романченко при участии автора работы. Проведение исследования с коммутацией ФППК интерферометром Михельсона проведено при участии Панченко Ю.Н. Пучикина А.В. Алексеева С.В. Лубеко Д.М.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1.1 Описание экспериментальной установки, для коммутации ФППК

В ходе решения поставленных задач был разработан источник резонансной зарядки с оригинальной конструкцией, представленной на рисунке 1.

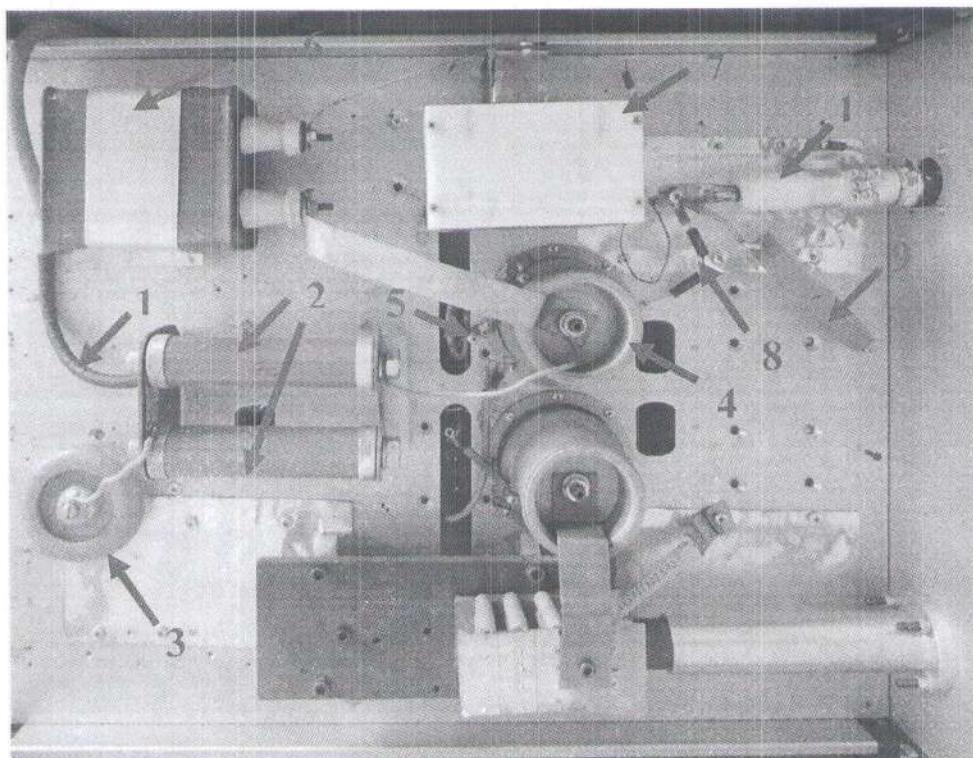


Рисунок 1. Конструкция источника резонансной зарядки: 1 - выходной кабель высоковольтного источника постоянного тока ИПВ-0.1-30-0.1 П, 2 - зарядные резисторы 1 Мом, 3 - демпфирующий конденсатор К15У-1 с 20 кВ и 330 пФ, 4 - тиратрон ТПИЗ-10К, 5 - выходные кабели управляющих модуляторов к тиратронной сетке, 6 - конденсатор КБГ-П 25 нФ 10кВ, 7 - одновитковый трансформатор, 8 – высоковольтные диоды, 9 – балансный резистор ТВО 15к 20Вт, 10 - выходные коаксиальные кабели генератора “Telegartner”.

Принцип работы источника следующий: высоковольтный конденсатор КБГ-П $C = 25$ нФ и рабочим напряжением 10кВ (6) заряжается от

высоковольтного источника INSITEK ИПВ-0.1-30-0.1 П (1) до напряжения от 1 до 5кВ через зарядные резисторы (2). Затем происходит разрядка конденсатора через тиратрон ТПИЗ – 10к/25 (4) на первичный виток высоковольтного трансформатора (7) с коэффициентом трансформаций 9, формируя высоковольтную полуволну длительностью по полувысоте 250нс на вторичной обмотке подключенной к отрезку коаксиального кабеля RFA-7/8 (10). Разрядка конденсатора (6) происходит по импульсу, приходящему от управляющего модулятора (5) на сетку тиратрона. Зарядка коаксиального кабеля осуществляется через резистор (9) ТВО с номиналом 15кОм и мощностью 20 ватт зашунтированный высоковольтными диодами (8) для удаления положительной части сигнала. В данной конструкции на выходе коаксиального кабеля можно получить полуволну длительностью 250 нс с амплитудой от 4 кВ до 32кВ, что полностью перекрывает рабочий диапазон исследуемых ФППК от 8кВ до 32кВ.

1.2 Конструкция ФППК

Кристалл ФППК предоставлен технологическим отделом ЦиР "ПТМ" ТГУ и представлял собой прямоугольный параллелепипед с размерами 12х5х0.6мм или другими в зависимости от предельного напряжения (показан на рисунке 2). Кристалл изготовлен из пластин GaAs, однородно легированных Cr в процессе диффузии и имеющих удельное сопротивление порядка 10^9 Ом*см. ФППК представлял собой планарный p-i-n диод, поданодная область которого создавалась диффузией цинка (p-тип проводимости), а подкатодная область - диффузией кремния (n-тип проводимости). Омические контакты изготовлены с применением AuGe сплава на поверхности легированных областей кристалла с последующим нанесением электрохимическим способом контакта из Au. Корпус ФППК выполнен из поликора марки "ВК100-1" ($\epsilon = 9,9$) толщиной 1 мм в нем под кристаллом вырезано прямоугольное окно 9х10 мм (размеры меняются в зависимости от предельного напряжения) и состоит из основания, на которое

осаждены золотые планарные “т” образные контакты для подключения во внешнюю цепь и верхней крышки, придающей жёсткость корпуса. Монтаж кристалла ФППК реализован при помощи токопроводящего клея.

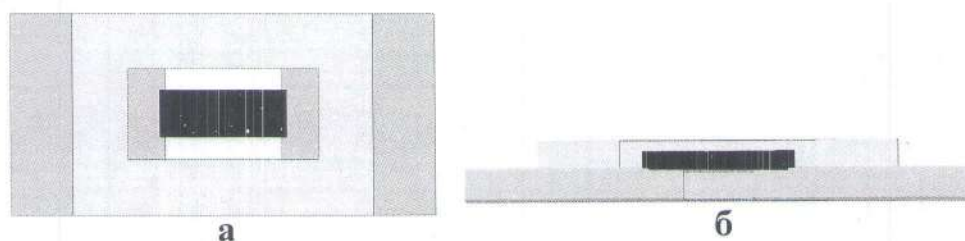


Рисунок 2. Конструкция ФППК, вид сверху (а), вид сечения ФППК (б).

Изготовленная конструкция позволяет коммутировать ФППК по поверхности кристалла расположенного в плоскости контактов, так и через толщу кристалла облучая лазерным излучением противоположную верхнюю плоскость кристалла и создавая большое количество неравновесных носителей заряда в толще полуизолирующего GaAs:Cr.

1.3 Расчет волноводной камеры для установки ФППК

Подключение волноводной камеры с исследуемым ФППК производится коаксиальными кабелями от источника и согласованной нагрузки. Для согласованного подключения и корректной оценки временных параметров ФППК с планарной конструкцией в волноводной камере требует расчета геометрии двойного коаксиально–микрополоскового перехода и камеры, который залит компаундом “Sylgard 184” или “Пента- 312”. Геометрия камеры рассчитана и оптимизирована на волновое сопротивление коаксиального тракта равного 50 Ом и предельному электрическому полю пробоя герметика 19 кВ/мм (“Sylgard 184”). Электромагнитный расчет производился в специализированной программе CST studio. В которой основными задачами был расчёт распределения поля в камере с геометрическим эквивалентом ФППК состоящим из проводящего материала без сопротивления (ПЕС) с залитым компаундом и согласование волнового импеданса. Результат расчета приведен на рисунке 3, где наибольшая

напряжённость электрических полей располагаются в области углов золотых контактов, нанесенных методом напыления на основание из поликора. что является потенциальной точкой пробоя компаунда.

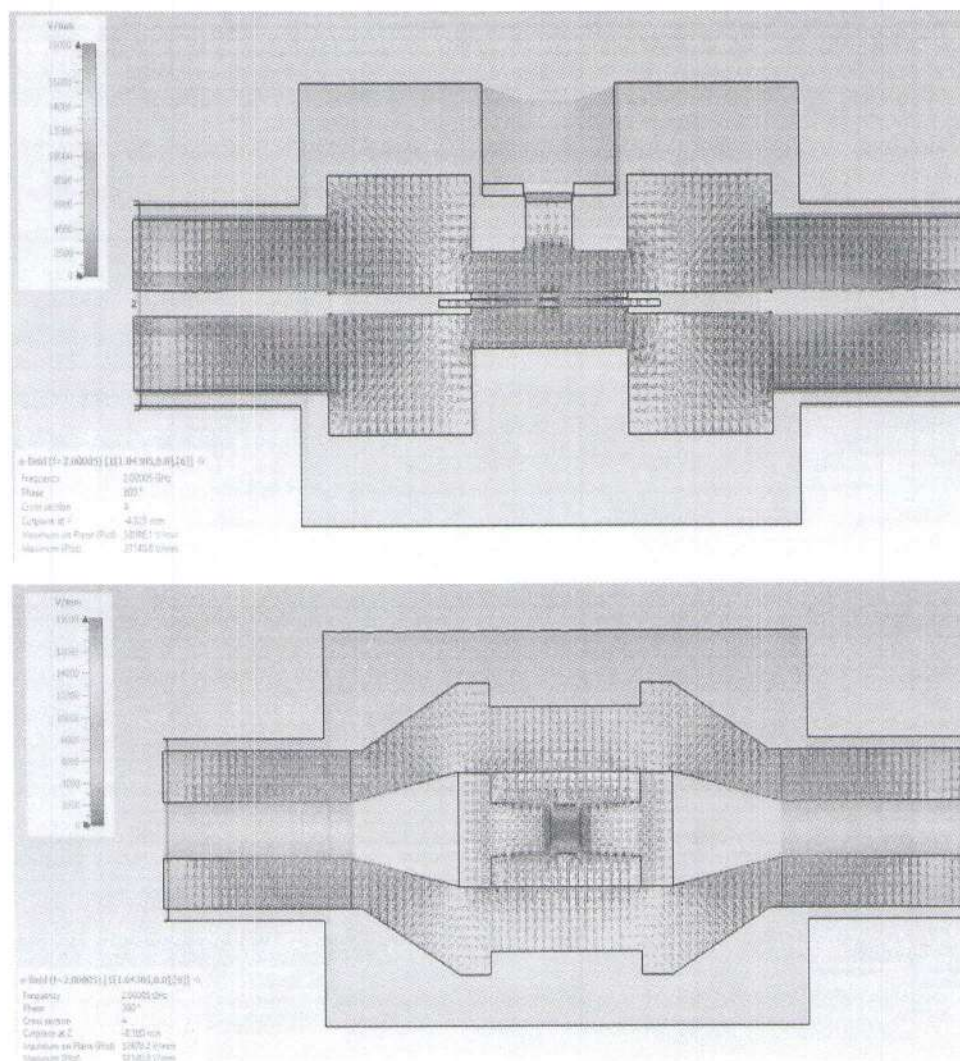


Рисунок 3. Результат моделирования ЭМ поля в камере для ФППК

Для анализа согласования был проведен расчет осциллограмм для этой же конструкции камеры с ФППК и компаундом, результат представлен на рисунке 4.

Результаты моделирования показывают, что максимальная амплитуда отраженного сигнала не превышает 4,5% или 27Дб для импульса с фронтом 1нс. По результатам расчета была спроектирована конструкция камеры, при ее измерениях в “железе” на векторном анализаторе цепей Agilent PNA,

установлено что достоверные измерения при малом коэффициенте отражения (-15дБ) можно проводить в плоть до 700 пс.

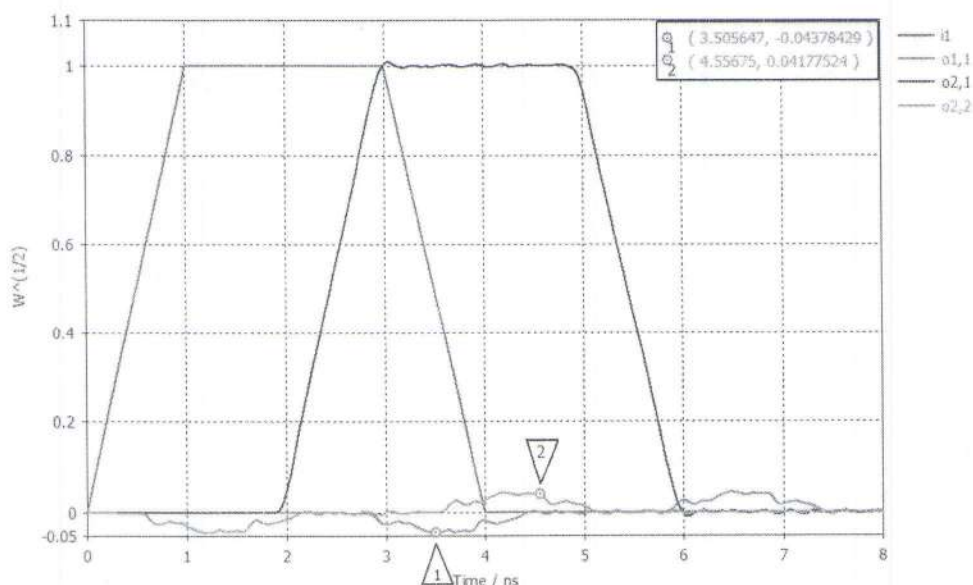


Рисунок 4. Расчетные осциллограммы импульса, прошедшего через камеру с ФППК, где красный луч – входной сигнал, синий луч – выходной сигнал, коричневый луч – отраженный сигнал от входного порта, зелёный луч – отраженный сигнал от входного порта,

2. Влияние микронного слоя SiO_2 поверхности кристалла ФППК на основе GaAs на параметры коммутаций.

Большое усиление электрического поля на тонких золотых контактах приводит к развитию поверхностного пробоя, для его исключения на этапе изготовления кристалла на лицевую плоскость кристалла GaAs легированного хромом нанесен слой SiO_2 путем магнетронного напыления. Оценка влияния такого слоя на коммутационные характеристики проведена с помощью схемы эксперимента показанной на рисунке 5а.

Методика эксперимента следующая, модулятор управляемый через интерфейс Ethernet с помощью ПК, формирует высоковольтный импульс для зарядки отрезка коаксиального кабеля RFA-7/8 котрый соединяет модулятор с волноводной камерой и параллельно формирует импульс синхронизаций TTL

– уровня для запуска лазера DTL-375QT. В программе с точностью до 10 нс устанавливается задержка импульса синхронизации при условии что момент начала лазерного облучения совпал с наибольшим амплитудным значением высоковольтного зарядного импульса. Лазерным пучком с фронтом 2,7 нс, длительностью 6 нс с энергией в импульсе 25 мкДж засвечивается средняя часть кристалла ФППК на расстоянии 1 метр со смещением с к р-области обозначенная красным цветом на рисунке 5б.

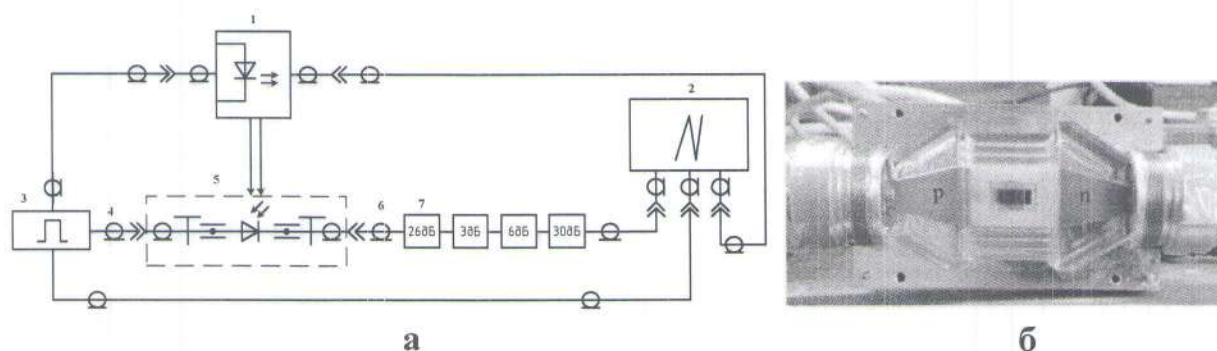


Рисунок 5. Схема эксперимента по коммутаций ФППК на нагрузку 50 Ом (а): 1 –YAG лазер DTL-375QT, 2 – осциллограф DSO9254A , 3 – источник высоковольтных импульсов напряжения, 4 и 6 – высоковольтный коаксиальный кабель RFA-7/8, 5 – камера для ФППК, 7 – высоковольтный аттенюатор АТ-20-4 4Вт. Камера с установленным ФППК (б).

В момент облучения происходит поглощение фотонов лазерного излучения в кристалле что приводит к генераций электронно дырочных пар вблизи поверхности кристалла. Полученные носители заряда в слаболегированной области создают проводимость между р-областью и п-областью что приводит к разряду коаксиального кабеля через высоковольтный аттенюатор АТ-20-4 обладающим импедансом 50 Ом, предельным напряжением измерения 20кВ и коэффициентом ослабления 26дБ. Дополнительно для ослабления сигнала используются еще 3 аттенюатора Radiall с номиналами 3дБ мощностью 25Вт, 6дБ и 30дБ мощностью 30 Вт. Ослабленный сигнал с сумарными ослаблением в 65 дБ регистрируется цифровым осциллографом Agilent DSO9254 с частотой пропускания 2,5 ГГц, параллельно регистрируется синхро импульс

от блока запуска лазера и зарядный импульс от модулятора с помощью емкостного высоковольтного делителя Атаком АСА-6039.

Первая часть экспериментов производилась ФППК с оксидным слоем на лицевой стороне коммутатора. Коммутация ФППК осуществлялась путем облучения плоскости кристалла где отсутствуют контакты, импульсным лазерным излучением. По результатам экспериментов построена кривая зависимости внутреннего сопротивления коммутатора в проводящем состоянии от зарядного напряжения представлена на рисунке 6а. Для сравнения оксидный слой был стравлен с лицевой поверхности кристалла ФППК и эксперимент был повторен. В результате была получена зависимость внутреннего сопротивления от уровня зарядного напряжения без оксидной пленки, показанная на рисунке 6б.

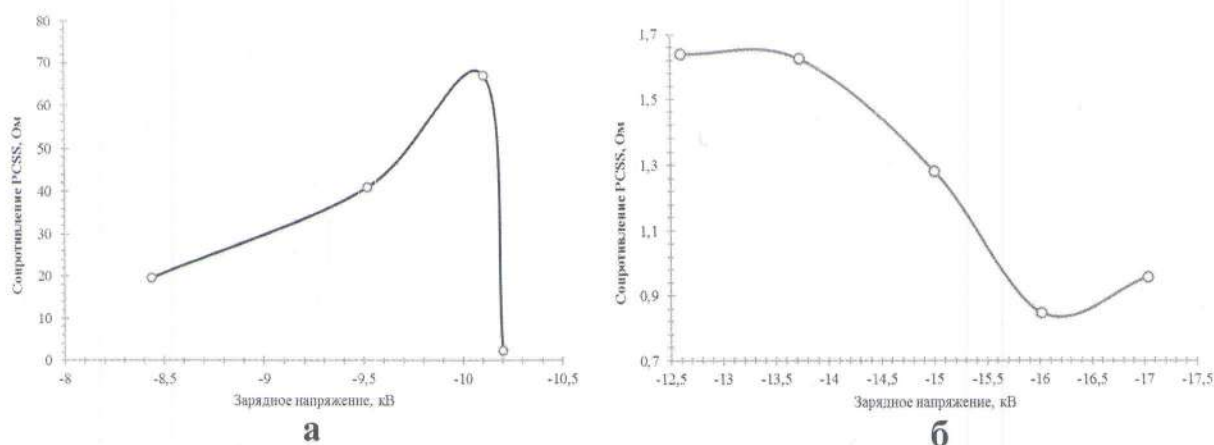


Рисунок 6. Зависимость внутреннего сопротивления коммутатора от зарядного напряжения с нанесенным слоем SiO_2 (а), и без слоя SiO_2 (б).

При проведении экспериментов, были попытки с коммутировать ФППК облучая его с лицевой стороны, но они не были успешными. Учитывая, что 99% лазерного излучения поглощается в GaAs толщиной 50 нм [13] объяснением могут служить наличие дефектов от травления оксидной пленки, что приводило к частичным рекомбинациям электронно-дырочных пар. В случае с оксидной пленкой основанием может служить искажения поверхности пленки, что приводит к неравномерному рассеянию лазерного

излучения и не позволяет получить не обходимое количество носителей заряда для получения нелинейного режима усиления.

3. Влияние энергий кванта лазерного излучения на параметры коммутации ФППК

Оценка воздействия лазерного излучения с двумя энергиями квантов 3,5 эВ и 1,17 эВ проводилась путем облучения одного ФППК имеющим габаритные размеры кристалла 11,5 x 5 мм, толщину 0,6 мм и зазором между контактов 8 мм что соответствует расчетному предельному импульсному напряжению коммутаций до 28 кВ. Источниками лазерного излучения были YAG-лазер LOTIS ТП LS2137U с длиной волны излучения 1064 нм (1,17 эВ) обеспечивающий коммутацию с энергией кванта меньше чем запрещенная зона и YAG-лазера Laser Export DTL-375QT с длиной волны 355 нм (3,5 эВ) с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны более чем в 2 раза. Для измерения энергий лазерных пучков использовался оптический калориметр Genetec_E Maestro, а временные характеристики оптического управляющего импульса с помощью фотодетектора DET08C/M InGaAs и DET10A2.

Постановка схемы эксперимента аналогична рисунку 5а с единственным отличием что лазеры были использованы для двух длин волн. Использование излучения с длиной волны 355 нм приводит к резкому поглощению излучения в приповерхностном слое GaAs толщиной 50 нм [13], что соответствует поглощению оптической энергии с существенно большей локальной плотностью по сравнению с облучением на длине волны 1064 нм.

Облучение кристалла происходило с расстояния 1,07 м для засветки всей площади кристалла с максимальной энергией оптического импульса 25 мкДж (355 нм) или 0,51 м с оптической энергией 345 мкДж (1064 нм). Временные характеристики оптического управляющего импульса зафиксированы фотодетектором DET08C/M InGaAs с шириной полосы пропускания 5 ГГц импульсов от YAG-лазера Laser Export DTL-375QT (355 нм), рисунок 7а и

фотодетектором DET10A2 импульсов от YAG-лазера Lotis Tll LS-2137U (1064 нм), рисунок 7б.

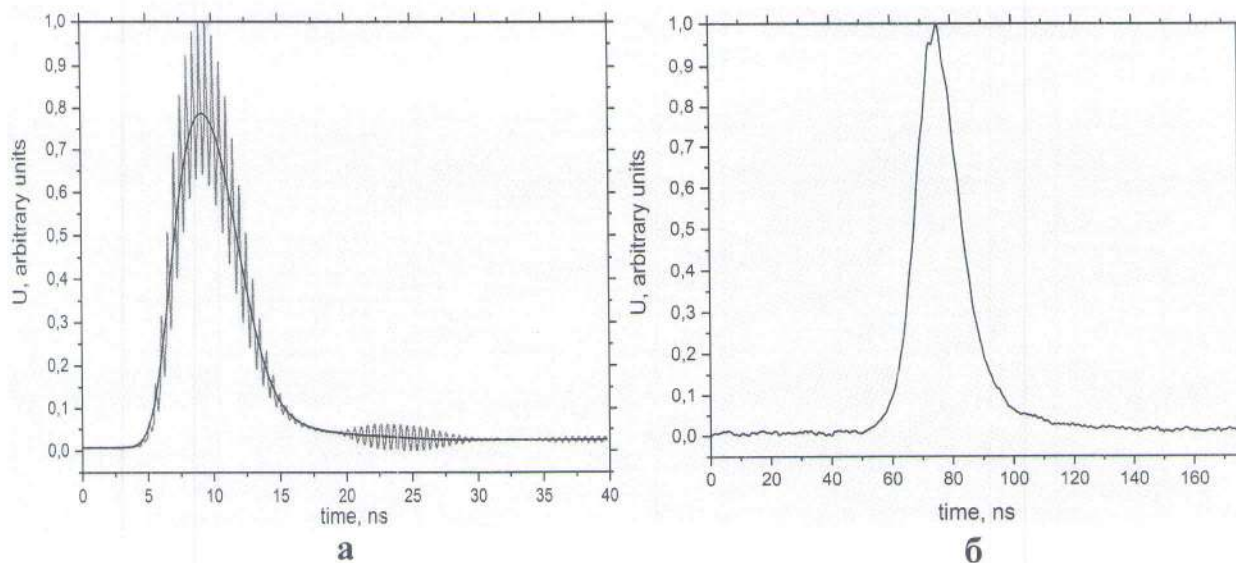


Рисунок 7. Временные характеристики оптического импульса от Laser Export DTL-375QT с длиной волны 355 нм и оптической энергией 25 мкДж (а).

Временные характеристики оптического импульса от Lotis Tll LS-2137U с длиной волны 1064 нм и оптической энергией 345 мДж (б).

Длительность фронта у лазера на длине волны 1064 нм составляет 11,6 нс против 2,7 нс у лазера на 355 нм с усреднением пробегов по резонатору с характерным временем 174 пс. Длительность по полувысоте у лазера на длине волны 1064 нм составляет 16 нс, а длительность усредненного импульса лазера на длине волны 355 нм равна 5,7 нс. Лазерный импульс на длине волны 355 нм примерно в три раза короче по общей длительности и в четыре по длительности фронта, чем лазерный импульс на длине волны 1064 нм. А отличие по оптической энергии в импульсе составляет в 14 раз (25 мкДж против 345 мкДж).

Сравнение параметров при коммутации ФППК лазерными импульсами, имеющими энергию кванта 3,5 эВ или 1,17 эВ проводилось при зарядном напряжении $\approx 13,7$ кВ. Осциллограммы коммутации ФППК лазерными импульсами на длине волны 1064 нм и 355 нм приведены на рисунках 8 (а, б). Минимальное сопротивление коммутатора в случае облучения на длине волны

1064 нм составляет 7,7 Ом при уровне выходного напряжения 5,9 кВ. Временные характеристики выходного импульса – длительность фронта равна 4,3 нс и длительность по полувысоте 39,3 нс. В случае облучения на длине волны 355 выходное напряжение равно 6,6 кВ, а сопротивление ФППК в момент коммутации составляет 2,3 Ом. Длительность фронта выходного импульса равна 6 нс, а длительность по полувысоте – 33,03 нс.

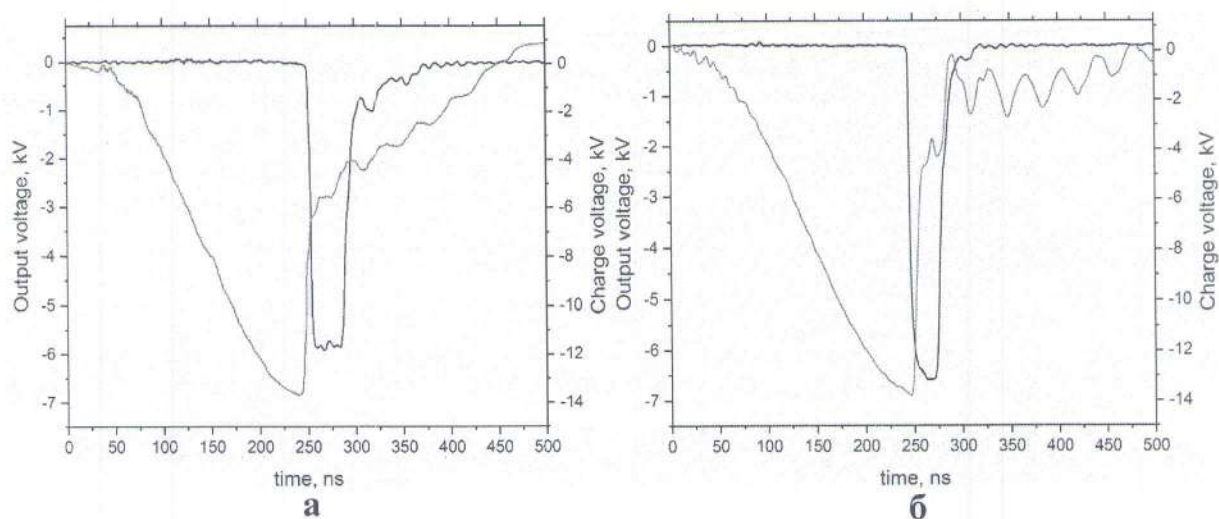


Рисунок 8. Осциллограммы коммутации ФППК лазерными импульсами на длине волны 1064 нм (а) красный луч зарядное напряжение, черный луч выходной импульс и при коммутации с длиной волны 355 нм (б).

Затянутый фронт импульса выходного напряжения является следствием индуктивности проводящего канала и его малого размера поперечного сечения. Малое сопротивление канала при уменьшении его поперечного сечения в свою очередь говорит о существенном росте проводимости при облучении ключа на длине волны 355 нм в сравнении с результатами для длины волны 1064 нм. Меньшая выходная амплитуда при коммутации пучком на 1064 нм в сравнении с результатами, полученными при коммутации пучком на 355 нм наблюдалась в диапазоне от 9 кВ до 13,7 кВ зарядного напряжения. При коммутации лазером на 355 нм наблюдается быстрая деградация из-за протекания большой плотности тока на один проводящий канал (филамент). Увеличение ресурса возможно путем увеличения количества проводящих

каналов в одном ФППК, в литературе подобный режим коммутаций называется мультифиламентным, либо проводить коммутацию множества параллельно включенных ключей.

4. Согласование волноводной камеры для двух ФППК за счет смещения электрического поля от окна ввода лазерного излучения

Поскольку волновая камера упомянутая в пункте 1 не может удовлетворить требуемым параметрам в случае установки двух ФППК, будет расчет еще одной камеры. Условия для расчета геометрий камеры в CST Microwave Studio следующие. Согласование импеданса камеры с входным и выходным коаксиальным кабелями “Draka RFA 7/8” имеющими импеданс 50 Ом с учетом геометрий двух ФППК на основе GaAs подключенных параллельно и передача без искажений высоковольтных импульсов амплитудой 30 кВ и фронтом импульса порядка 600 пс с максимальной напряженностью электрического поля не более 40 кВ/мм.

Конструкция ключа приведена на рисунке 2 в пункте 1.2, где кристалл GaAs с габаритами 0,6x5x17 мм припаян на планарные “т” образные контакты с размерами в узкой части 0,01x9x9 мм напыленные на подложке из поликора с $\varepsilon = 9,9$ с прямоугольным окном 9x10 мм под местом крепления кристалла. Для исключения поверхностного пробоя ключи залиты изолирующим силиконовым гелем “Пента-320” с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,7$ и предельной напряженностью поля 40 кВ/мм.

Методика решения задачи выполнена в два этапа. Первый этап выполняется в расчете S – параметров в заданной геометрий для частотного диапазона примерно в 2,5 раза превышающего (0,01 – 4 ГГц) требуемый диапазон 0,01 – 1,67 ГГц. При расчете в частотной области геометрия камеры оптимизируется, для достижения импеданса в 50 Ом. Второй этап производится во временной области для определения влияния

оптимизированной геометрий камеры на высоковольтный сигнал и областей повышенной напряженности электрического поля.

В расчетах в частотном диапазоне изначальные габариты сложного профиля камеры разделены на контактную область (боковые часть камеры) и область установки кристалла ФППК (центральная часть). Область контактов определялась резким переходом центрального проводника круглой формы (коаксиальной линий) в полосковую линию в форме трапеций относительно горизонтальной плоскости из-за планарных контактов ФППК. Заданная форма перехода определяет изнутри форму камеры в масштабированном размере, при этом являясь проводником внешнего контакта подводящих коаксиальных кабелей. Определение масштабированного размера, для трапецеидального участка проводилось путем его представления двумя прямоугольными параллелепипедами с габаритами в горизонтальной плоскости в начале и конце трапеций. После определены размеры внешнего проводника, которым является камера с помощью стандартной формулы (4.1) волнового сопротивления коаксиала с полосковой линией при учете импеданса свободного пространства из справочника по волновым сопротивлениям фидерных линий [14].

$$Z_0 \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{1+a/b}{W/b+t/b}\right) \quad (4.1)$$

Где, ϵ_r -диэлектрическая проницаемость силиконового компаунда, а - ширина внешнего проводника, b - высота внешнего проводника, t - толщина центрального проводника или кристалла ключа, W - ширина центрального проводника или кристалла ключа.

Размеры области установки ключей, определяются в первую очередь габаритами керамической подложки из поликора, с учетом что кристалл является более объемным проводящим объектом в проводящем состоянии, тогда центральная часть камеры определяется по тому же выражению что и контактная область. В итоге получаем геометрию камеры, состоящую из трех

отрезков прямоугольного коаксиала с плоской линией, в которой коаксиалы в боковых частях камеры в горизонтальной плоскости трансформированы в трапецию, а в центральной части над межэлектродными контактами ключей сделано отверстие в камере для прохождения лазерного излучения (рисунок 9 а, б). Геометрия камеры была оптимизирована, с помощью доверительных интервалов до согласования волнового сопротивления. Рассчитанные S -параметры оптимальной геометрии с минимальным шагом разбиений сетки 0,2 мм и максимальным шагом 5 мм представлены на рисунке 9в.

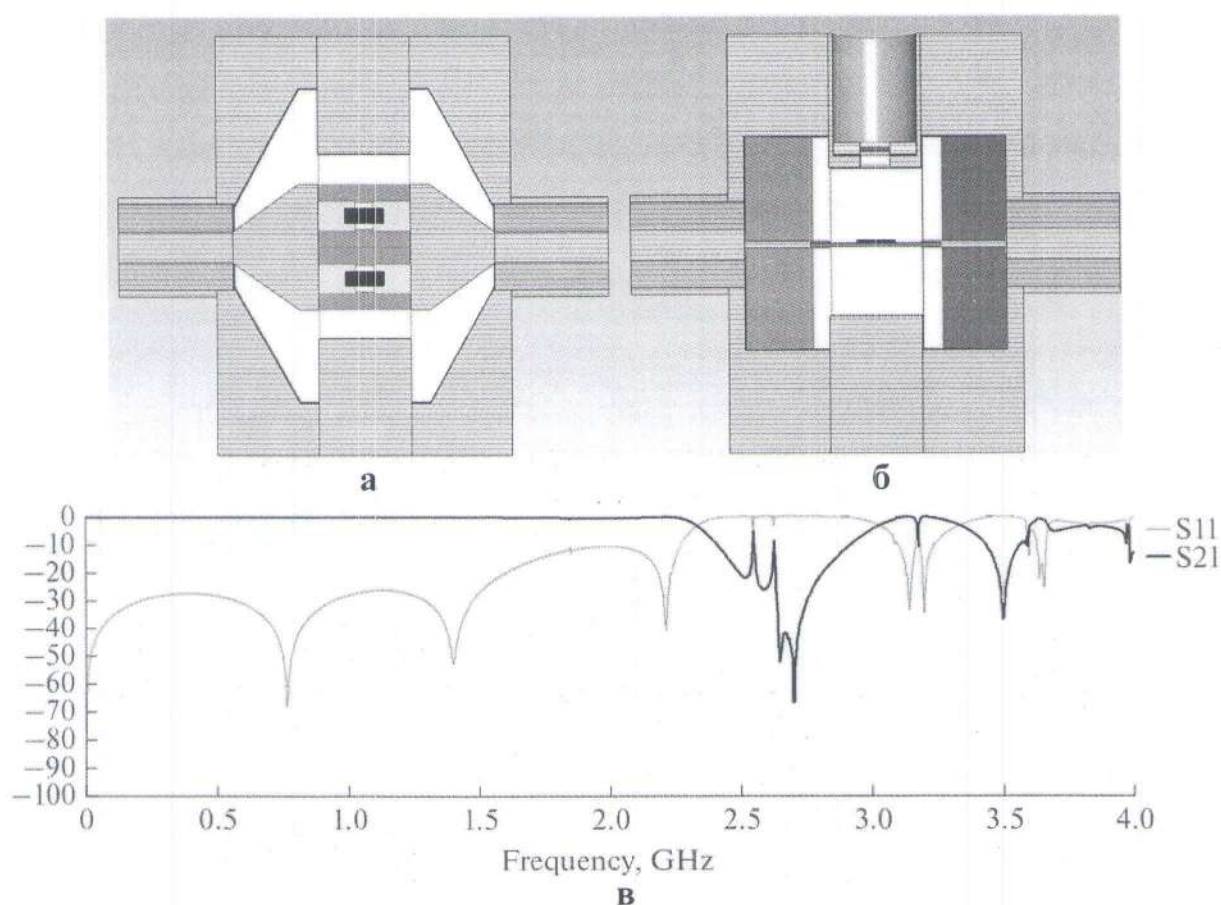
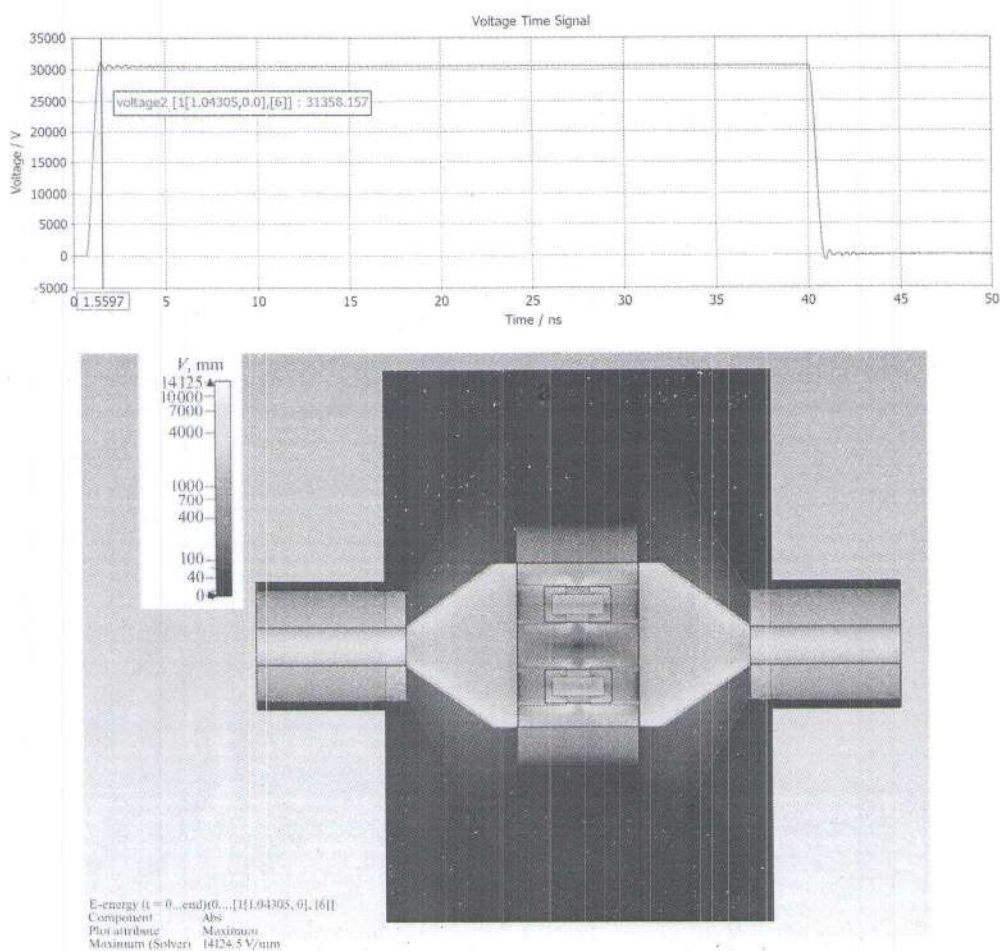


Рисунок 9. Частотное моделирование. (а) Рассчитываемая геометрия камеры с ФППК, горизонтальная проекция, (б) геометрия камеры с ФППК, вертикальная проекция, (в) рассчитанные S параметры оптимальной геометрий камеры.

Временном расчет произведен для оптимальной геометрии, полученной из частотного диапазона. С помощью портов на оптимальную геометрию

подан тестовый импульс амплитудой 30,5 кВ с фронтом 600 пс и длительностью по полувысоте 40 нс. Результаты временного анализа на рисунке 3а, показываю величину отраженной волны амплитудой в 860 В что соответствует 2,8 % от амплитуды основного импульса (Рисунок 10а). Дополнительный расчет напряженности электрических полей (Рисунок 10б) показывает, область с максимальным полем 14,4 кВ/см при расчетном шаге временной сетки 50 пс.

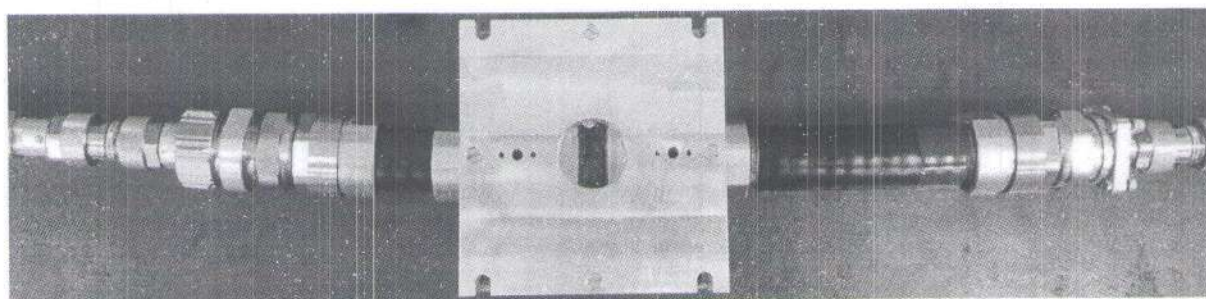


6

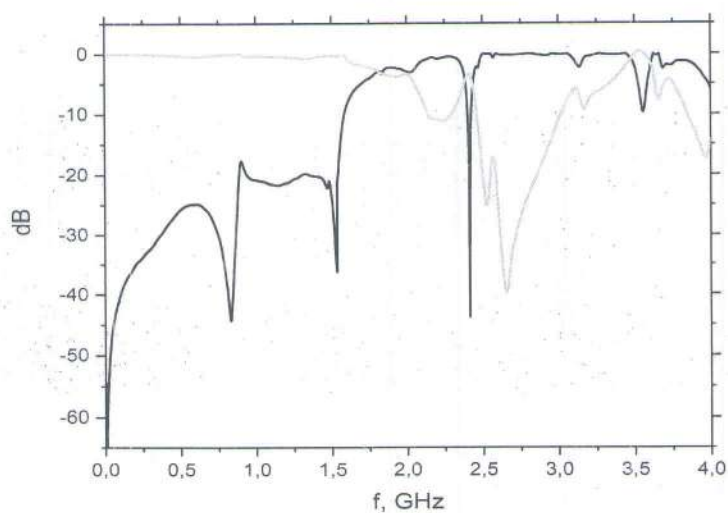
Рисунок 10. Временной расчет параметров камеры при приложенном высоковольтном импульсе. (а) Расчетная осциллограмма импульса, прошедшая через камеру, (б) распределение напряженности электрического поля с максимальным значением в горизонтальные проекции.

После решения задачи моделирования и определения оптимальной геометрий, камера с контактами была изготовлена из дюралюминия марки Д16

и меди марки М1 соответственно. Перед измерениями в камеру был установлен корпус из поликора от ФППК в котором кристалл был заменен медным эквивалентом и залит силиконовым гелем с двумя установленными отрезками коаксиального кабеля, имеющими на концах коаксиальные ВЧ разъёмы. Измерение происходило векторным анализатором цепей “Agilent Technologies PNA N5227A” в частотном диапазоне от 0,01 до 4 ГГц. Перед измерением была проведена калибровка оснастки с разрешением 40001 точек на диапазон. Внешний вид камеры и результаты измерения параметров рассеяния приложены на рисунке 11а и 11б соответственно.



а



б

Рисунок 11. Измерение на ВАЦ камеры изготовленной с оптимальной геометрией. (а) Внешний вид камеры с кусками коаксиального кабеля, высоковольтными разъёмами и переходниками, (б) Измеренные S-параметры на ВАЦ, черная линия S11 а серая S21.

Измеренные параметры, показывают согласование по уровню -17,7 Дб до 1,55 ГГц для S11 и минимальным значением S21 равным -0,74 Дб. Отличием теоретического и измеренного значения S21 является область ухудшения проводимости в диапазоне 1,7 до 2,25 ГГц. В случае параметра рассеяния S11 отмечаются ухудшения согласования по сравнению с теоретическим расчетом на частоте около 0,9 ГГц на 2,3 Дб и в диапазоне от 1,7 до 2 ГГц порядка 10 Дб. Изменение рассчитанных резонансных частот и снижение согласования полученных в ходе измерения характеристик реальной камеры возможно обусловлены следующими факторами. Отсутствием в расчете геометрий разъемов для входного и выходного коаксиального кабеля, потерь в проводящих компонентах и диэлектрике, точностью геометрических размеров изготовления камеры и ее элементов. Более точный расчет с учетом перечисленных параметров, затрат много ресурсов и времени, но позволит исправить не точности.

5. Формирование нескольких проводящих каналов в ФППК

Исследование о формировании двух филаментов на параметры коммутации проводились с использованием двух ФППК с расчетным максимальным рабочим напряжением 32 кВ и межэлектродный зазором 9,5 мм. Они были установлены параллельно в волноводную камеру (на рисунке 11а) заполненную герметиком “пента 312”. Лазерное излучение использованное в экспериментах с длиной волны 355 нм, имеет энергию кванта превышающую энергию запрещенной зоны GaAs, следовательно начальная ионизация кристалла производится через прямой фотоэффект. Средняя оптическая энергия импульса, измерена оптическим калориметром Gentec Eo Maestro в режиме счета однократных импульсов с предварительным затенением пучка для получения размеров автографа, соответствующего окну. Она составляет 140 мкДж за 100 импульсов со среднеквадратичным отклонением 29,58%. Волноводная камера имеет фрезерованные внутренние стенки, позволяющие эффективно рассеивать попадающее лазерное

излучение, по всей внутренней части включая контакты и ФППК. Результат параллельной коммутаций представлен осциллограммами на рисунке 12.

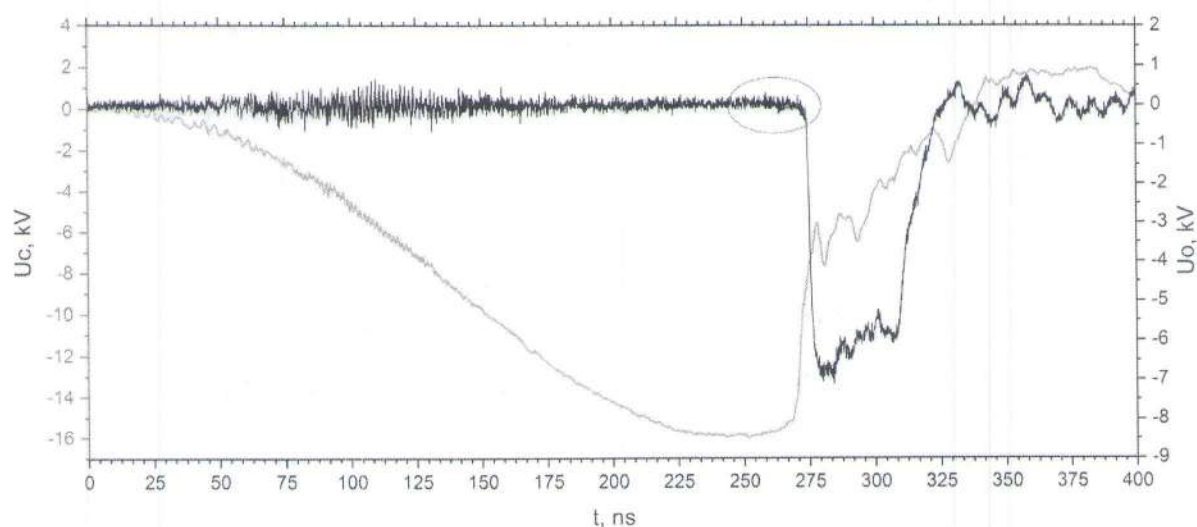


Рисунок 12. Осциллограммы проведенного эксперимента, 1— осциллограмма зарядного напряжения обозначена серой линией (U_c), 2 —осциллограмма выходного импульса обозначена черной линией (U_o).

По результатам эксперимента, получен выходной импульс с максимальной амплитудой 6,81 кВ и фронтом 1,15 нс. Зарядное напряжение в момент коммутации составляет 15,13 кВ, тогда минимальное сопротивление коммутатора равно 5,54 Ом. Характерное снижение амплитуды полки импульса объясняется влиянием снижения напряжения зарядного импульса. Длительность фронта оказывается короче в 4 раза по сравнению с длительностью фронта 4,3 нс выходного импульса при коммутации одного коммутатора. Более длительный фронт формируется вследствие большего значения индуктивности в момент коммутаций по сравнению с проведенными экспериментами, из-за распределения тока по двум каналам проводимости. Однако суммарное сопротивление обоих ФППК более высокое по сравнению с коммутацией лазером Laser Export DTL-375QT с более коротким фронтом импульса где сопротивление равно 0,85 Ом. Это возможно объяснить неоптимальными параметрами формирования филаментов в обоих коммутаторах при снижении внешнего электрического поля.

Для оценки синхронности параллельной коммутаций более детально увеличена область осциллограммы выходного импульса, обозначенная овалом на рисунке 12 а увеличенная осциллограмма представлена на рисунке 13, где тонкой линией обозначена исходная осциллограмма а толстой показаны ее значения после фильтраций с быстрым преобразованием Фурье с граничной частотой 2,5 ГГц.

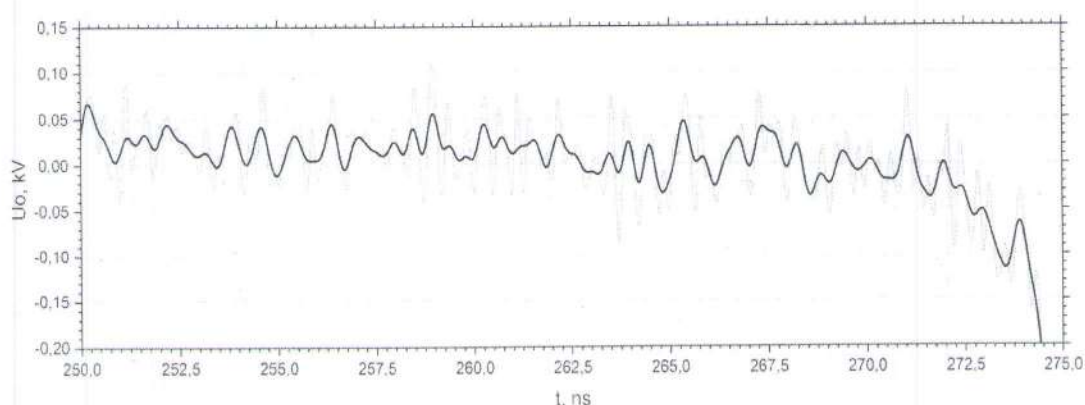


Рисунок. 13. Увеличенная область осциллограммы выходного импульса тонкая линия, после фильтрации с БПФ при частоте 2,5 ГГц.

При анализе части фронта увеличенной осциллограммы выходного импульса синхронность коммутаций коммутаторов настолько высока, что полученные осциллограммы на осциллографе с полосой пропускания осциллографа равной 2,5 ГГц и частотой дискретизаций 20 ГГц не позволяют достоверно определить задержку срабатывания между двумя коммутаторами. Согласно работе [4] задержка подобных коммутаторов составляет менее 200 пикосекунд, что требует соответствующих измерений на осциллографе с более широкой полосой. При таком воздействии отраженного лазерного излучения с задержкой 250 пс, невозможно получить формирование филамента на противоположной плоскости кристалла из-за распределения мощности по филаментам что и наблюдается в эксперименте. Для получения более достоверных результатов о влиянии количества филаментов на параметры коммутации был проведен еще один эксперимент. Эксперимент состоял в

формировании множества филаментов в ФППК с предельным рабочим напряжением 28 кВ и межэлектродным зазором 8 мм. Формирование нескольких филаментов происходило за счет применения интерферометра Майкельсона оптическая схема которого представлена на рисунке 14а а полученная интерференционная картина от него на рисунке 14б. Толщина оптического максимума интерференционной картины составляет 3,54 мм а минимума 1,7 мм.

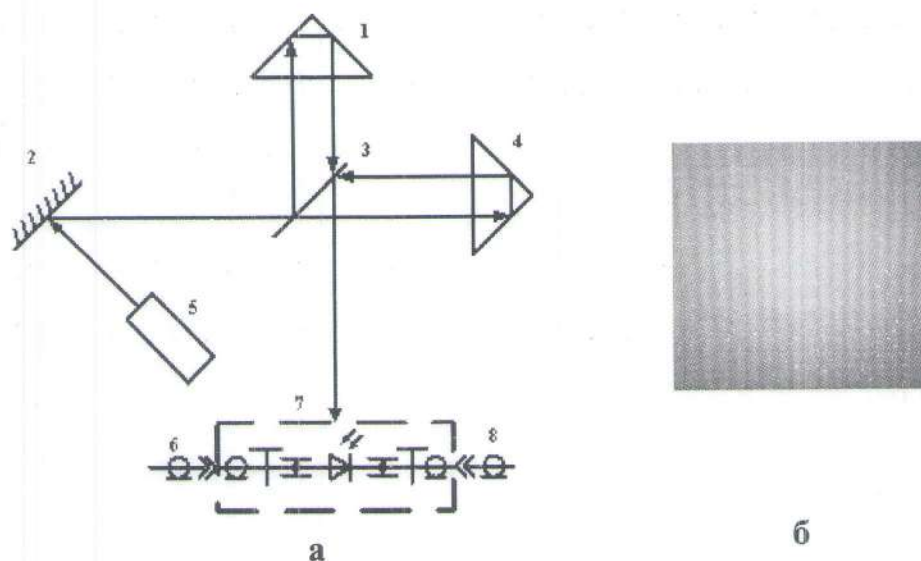


Рисунок. 14. Оптическая схема интерферометра с облучением ФППК внутри волноводной камеры (а), где 1,4—Оптические призмы, 2 – алюминиевое зеркало, 3– светоделительная пластина Thorlabs EBS2, 5 - Nd:YAG laser Solar LQ929, 6 –зарядный коаксиальный кабель, 7 – волноводная камера, 8 – выходной коаксиальный кабель., полученная интерференционная картина после сложения пучков (б).

Источником излучения интерферометра служил лазер (5) формирующий лазерный импульс с длиной волны 532 нм и длительностью 10 нс. Для отражения лазерного пучка на светоделительную пластину EBS2 с соотношением деления 50:50 (3) использовано алюминиевое зеркало (2). Полученные два пучка после светоделительной пластины отражались обратно на пластину для сложения, двумя оптическими призмами (1,4). Результат

сложения лазерных пучков, на делителе, приводящего к интерференции, направлен на волноводную камеру с ФППК (7) и в этот же момент на коаксиальный кабель 6 заряжен до максимального значения импульса от тиратронного модулятора. После коммутаций PCSS импульсом лазерного излучения, формируется выходной импульс, который передаётся по выходному коаксиальному кабелю (8) к высоковольтному аттенюатору.

Суммарная средняя энергия лазерного пучка перед волноводной камерой измерена калориметром Gentec Eo Maestro и составляет 220 мкДж при среднеквадратичном отклонении (RMS stability) 5.27% за 1000 импульсов. Использованное лазерное излучение с длиной волны 532 нм, производит начальную ионизация кристалла через прямой фотоэффект с глубиной полного поглощения в кристалле около 520 нм. При облучении поверхности коммутатора ФППК излучением имеющего распределение интенсивности по сечению в виде интерференционных полос, получены осциллограммы, показанные на рисунке 15.

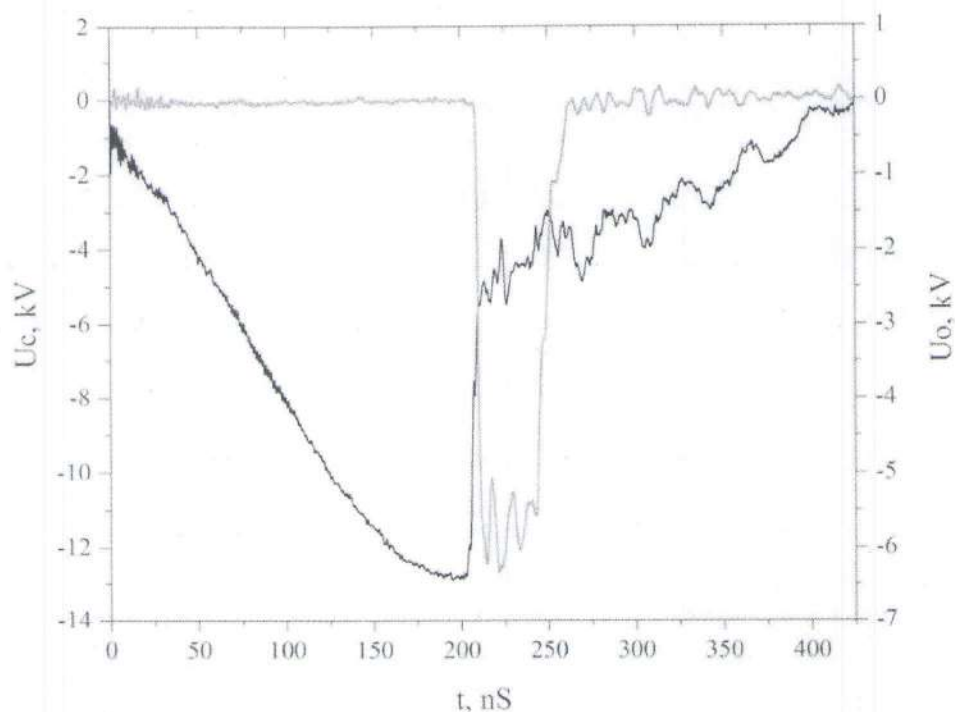


Рисунок 15. Осциллограммы зарядного напряжения черной луч и выходного импульса красной луч.

Зарядное напряжение на коаксиальном кабеле в момент коммутаций составляет 12,74 кВ (черная линия) а амплитуда выходного импульса (красная линия) по усредненному значению составляет 5,78 кВ при максимальном значении 6,27 кВ. тогда внутреннее сопротивление ФППК составляет 5,12 Ом и 0,8 Ом соответственно. Сопротивление в 5 раз больше чем при использовании излучения с длиной волны 355 нм но меньше в 1,5 раза чем при использований излучения с длиной волны 1064нм. Временные характеристики выходного импульса следующие, фронт импульса равен 759,7 пс по уровню 0,1-0,9, длительность выходного импульса по полувысоте составляет 38,5 нс что соответствует двойному пробегу по коаксиальному кабелю, а срез импульса по уровню 0,1-0,9 равен 6,37 нс. Полученный короткий фронт в ходе эксперимента показал объективное уменьшение индуктивности ФППК в момент коммутаций по сравнению с другими работами, проведенными с данными ФППК.

Суммарная индуктивность в момент коммутации только одного ключа может быть уменьшена только либо изменением конструкций волноводной камеры, электродов и конструкций PCSS либо путем возбуждения нескольких каналов проводимости. Учитывая, что данный эксперимент проведен с использованием того же оборудования, то этот факт позволяет утверждать, что получен мультифиламентный режим коммутаций ФППК при использовании интерференций. Дополнительное обстоятельство о снижении внутреннего сопротивления ФППК при протекании тока через несколько каналов проводимости можно объяснить протеканием сниженного тока по каналу по сравнению коммутацией, где присутствует только один канал. Косвенно это подтверждается достижением минимального сопротивления в 0,8 Ом при напряженности электрического поля в 15,9 кВ/см и использовании излучения с меньшей энергией кванта по сравнению с работами, проведенными с аналогичными ключами. Так же ресурс ФППК по количеству импульсов составил около $11 \cdot 10^3$ против

$18 \cdot 10^2$ срабатываний при коммутаций Laser Export DTL-375QT в однофиламентном режиме, что дополнительно подтверждает теорию распределения тока по нескольким каналам. Быстрое изменение сопротивления ключа в начальный момент коммутаций приводит к рассогласованию с нагрузкой, что проявляется как колебания на выходном импульсе.

Основные выводы по научной работе

1. Анализируя полученные данные с оксидной пленкой, можно видеть, что поле, необходимое для достижения режима нелинейного усиления, соответствует значению 8,5 кВ/см, приведенному в [4,5]. Электрическое поле в этом случае легко найти, так как зазор между электродами составляет порядка 1 см, однако внутреннее сопротивление переключателя увеличивается до тех пор, пока поле на PCSS не достигнет 10 кВ/см, затем происходит переключение с лавинной ионизацией, что резко снижает внутреннее сопротивление до 2,3 Ом. Эксперименты без оксидной пленки показали, что для достижения нелинейного режима требуется большее электрическое поле 12,6 кВ/см по сравнению с ФППК, имеющими оксидный слой. Возможным объяснением является эффект флюоресценции в GaAs:Cr и создающий излучение с длиной волны около 900 нм. Часть генерируемого излучения отражается от дефектов, полученных при нанесении оксидного слоя и от него самого, генерируя новые носители заряда в кристалле во время поглощения фотонов. Таким образом, переключение ФППК осуществляется при более низком электрическом поле. Внутреннее сопротивление без оксидного слоя, как видно, меньше и составляет 1,64 Ом. При увеличении электрического поля оно уменьшается до 0,85 Ом, но при достижении 17 кВ/см увеличивается до 0,96 Ом. Увеличение стойкости может быть связано с дополнительными потерями из-за дефектов в толщине структуры GaAs:Cr.

2. Лазерное облучение ФППК ультрафиолетовыми импульсами приводит к поглощению в кристалле GaAs, толщиной в десятки нанометров. Это приводит к формированию одноканальной коммутации с проводимостью канала, на порядок превышающей проводимость канала при облучении ФППК инфракрасными лазерными лучами. Высокая квантовая энергия более эффективно создает больше центров теплового излучения носителей заряда с последующей поддержкой образования коллапсирующих доменов, чем низкая квантовая энергия, которая не превышает ширину запрещенной зоны. Представленные результаты показывают, что режим нелинейного усиления хорошо компенсирует малое количество носителей заряда при использовании лазера с длиной волны 1064 нм. Дополнительным фактором является сокращение фронта оптического импульса в 4 раза, что позволяет ускорить ионизацию внутри кристалла. Следовательно, для генерации филаментов с более высокой плотностью тока требуется излучение с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны в 2-2,5 раза, с коротким фронтом около 3 нс. Кроме того, исходя из представленных данных, можно предположить, что эффект Франса-Келдыша при лазерном импульсе длиной волны 1064 нм оказал влияние на выходные параметры.

3. Частотный теоретический расчет согласования волнового сопротивления для геометрии волновой камеры с двумя фотопроводящими полупроводниковыми переключателями показал возможное согласование на уровне -20 дБ в S11 до частоты 1,6 ГГц. Измеренные параметры камеры, полученные на основе рассчитанной геометрии, показывают соответствие на уровне от 17,7 дБ до 1,55 ГГц, что хорошо согласуется с теоретическими результатами. Результаты расчета времени показали возбуждение колебаний с амплитудой, составляющей 2,8% от амплитуды основного импульса.

Если принять во внимание измеренные S-параметры, то импульс с фронтом 600 пс вызовет колебания с амплитудой, равной половине основного импульса, следовательно, в такой камере допустимо прохождение импульса с

фронтом более 650 пс. Рассчитанная напряженность электрического поля показала возможность использования изолирующего геля “Пента-312” при максимальном импульсном напряжении 30 кВ, а также продемонстрировала сильное усиление поля на тонких золотых контактах PCSS с взаимным экранированием поля от центральной области, что уменьшает негативное воздействие от окна для облучения ФППК.

5. Исследована коммутация двух PCSS при максимальном рабочем напряжении 32 кВ в субмикросекундном диапазоне с использованием одноимпульсного лазерного излучения с длиной волны 355 нм и энергией 140 МДж. В ходе эксперимента был получен выходной импульс с длительностью половинной высоты 38 нс и максимальной амплитудой 6,81 кВ при нарастании выходного импульса на 1,15 нс. Было показано, что минимальное суммарное сопротивление двух параллельных переключателей составляло 5,54 Ом, что было наилучшим для формирования филаментов обоих коммутаторов при уменьшении внешнего электрического поля.

При увеличении каналов проводимости или достижения мультифиламентного режима для ФППК, подвергнутых лазерному облучению при длине волны 532 нм, с периодической структурой интенсивности по поперечному сечению пучка по сравнению с работами где облучение аналогичных ФППК осуществлялось равномерным пучком, присутствовал более короткий фронт выходного импульса, а также увеличивался срок службы коммутатора до его полной деградации.

Публикации автора по теме работы

1. Effect on the GaAs parameters of a photoconductive semiconductor switch with a silicon oxide layer when switched by 355-nm laser radiation / V.V. Barmin, V.Yu. Konev, I.V. Romanchenko // В сборнике: Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. EFRE 2022. 2022. С. 361–366.

2. Influence on the parameters of GaAs-based hg PCSS switching in lock-on mode at laser radiation with a wavelength of 355 nm and 1064 nm / V.V. Barmin, V.Yu. Konev, I.V. Romanchenko // В сборнике: IEEE 24nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2023. 2023. С. 100 –104.

3. Photoconductive semiconductor switch behavior in multifilament mode under 532 nm laser irradiation / V.V. Barmin, A.V. Puchikin, I.V. Romanchenko // Russian Physics Journal. 2023. V.66. N8. P.875–879.

4. Switching parameters of two parallel photoconductive switches under 355 nm laser radiation / V.V. Barmin, A.V. Puchikin, I.V. Romanchenko // Russian Physics Journal. 2023. V.66. N9. – P.1011–1016.

5. Computational modeling and measurement of a waveguide chamber for two photoconductive semiconductor switches / V.V. Barmin, I.V. Romanchenko // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, V. 87. S 2. P. S223–S228.

Список цитируемой литературы

1 A new type of pulse-generating diode in GaAs / S. Yamashita, Y. Hosokawa, T. Anbe, and T. Nakano // Proceedings of the IEEE. 1970. V.58. P. 1279–1280.

2 Laser triggered Cr: GaAs HV sparkgap with high trigger sensitivity / S. Williamson, G.F. Albrecht, and G. Mourou // Review of Scientific Instruments. 1982. V. 53, P. 867–870.

3. Toward pulsed power uses for photoconductive semiconductor switches: Closing switches / G.M. Loubriel, M.W. O'Malley, F.J. Zutavern and all // Proceeding 6th IEEE Pulsed Power Conference. (Arlington USA). 1978. P. 145 – 148.

4. Triggering GaAs lock-on switches with laser diode arrays / G.M. Loubriel, W.D. Helgeson, D.L. McLaughlin, M.W. O'Malley and F. J. Zutavern // IEEE Transaction Electron Devices. 1991. V. 38. N.4 P. 692–695.
5. Lock-on physics in semi-insulating GaAs: Combination of trap-to-band impact ionization, moving electric fields and photon recycling / A.R. Chowdhury, J. C. Dickens, A.A. Neuber, R. Ness, and R.P. Joshi // Journal of Applied Physics. – 2018. V. 123. P. 085703.
6. Terahertz Emission from Collapsing Field Domains during Switching of a Gallium Arsenide Bipolar Transistor / S. Vainshtein, J. Kostamovaara, V. Yuferev, W. Knap, A. Fatimy and N. Diakonova // Physics Review Letter. 2007. V. 99. P.176601.
7. Negative differential mobility in GaAs at ultrahigh fields: Comparison between an experiment and simulations / S. Vainshtein, V. Yuferev, V. Palankovski, D. Ong and J. Kostamovaara // Applied Physics Letter. 2008. V. 92. P. 062114.
8. Collapsing Field Domains in Avalanche GaAs Transistors: Peculiar Phenomenon and Prospective Applications / S. Vainshtein, V. Yuferev, J. Kostamovaara and V. Palankovski // Annual Journal of Electronics. 2010. V. 4. P.12 – 17.
9. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами / С.С. Хлудков, О.П. Толбанов, М.Д. Вилисова, И.А. Прудаев; под редакцией О.П. Толбанова, Томск: Издательский Дом ТГУ, 2016. 256 С.
10. High Gain GaAs Photoconductive Semiconductor Switches (PCSS): Device Lifetime, High Current Testing, Optical Pulse Generators / F.J. Zutavern, G.M. Loubriel, H.P. Hjalmarson, A.G. Baca, T.A. Plut, R.R. Gallegos, W.D. Helgeson, and M.W. O'Malley // in Proceedings of SPIE Optically Activated Switching IV. 1994. V. 2343. P. 146-154.

11. High Gain GaAs Photoconductive Semiconductor Switches for Ground Penetrating Radar / G. M. Loubriel, J.F. Aurand, F.J. Zutavem, W.D. Helgeson, M. W. O'Malley, and D.J. Brown // in Proceedings of 22nd International Power Modulator Symposium (Boca Raton, FL, USA, 25-27 June 1996.). P. 165-168.

12. Photoconductive semiconductor switches / G.M. Loubriel, F.J. Zutavern, A.G. Baca, H.P. Hjalmarson, T.A. Plut, W.D. Helgeson, M.W. O'Malley, M.H. Ruebush, D.J. Brown // IEEE Transactions on Plasma Science. 1997. V.25. N.2. P.124-130.

13. Refractive indices of MBE-grown $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ternary alloys in the transparent wavelength region / K. Papatryfonos, T. Angelova, A. Brimont, B. Reid, S. Guldin, P. R. Smith and et all // AIP Advanced. 2021. V.11. P. 025327.

14. Gunston, M.A.R. Microwave Transmission—Line Impedance Data / Gunston, M.A.R. // New York: Van Nostrand Reinhold. 1972. – 281 P.