

На правах рукописи

САДЫКОВА АННА ГЕННАДЬЕВНА

**ФИЗИКО – ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНХРОНИЗАЦИИ
ПИКОСЕКУНДНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук
член – корреспондент РАН
Шпак Валерий Григорьевич

Официальные оппоненты ученая степень
ученое звание
место работы
должность
ФИО

ученая степень
ученое звание
место работы
должность
ФИО

Ведущая организация ФФФФФФФФФФФФ

Защита состоится «00» ноября 2013 г. в 15.00 на заседании диссертационного
совета Д 004.024.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук
по адресу: 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ваши отзывы в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью, с
указанием даты подписания просим выслать по адресу: 620016, Екатеринбург, ул.
Амундсена, 106, ИЭФ УрО РАН. Диссертационный совет Д 004.024.01.

Автореферат разослан «00» октября 2013 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 004.024.01
Доктор физико – математических наук

Н. Н. Сюткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема исследования быстропротекающих электроразрядных процессов возникла сразу же как появились первые импульсные высоковольтные источники электрической энергии. А если учесть первые опыты с атмосферным электричеством, то намного раньше. Однако с самого начала такие исследования были ограничены возможностями измерительной аппаратуры. По мере ее совершенствования в разряд быстропротекающих относили все более короткие процессы. В частности, началом интенсивного исследования наносекундного диапазона следует считать конец 40-х годов, пикосекундный диапазон начал осваиваться в конце 20 века. Тем не менее, известны экспериментальные результаты 60-летней давности, где обсуждаются возможности генерирования и измерения наносекундных импульсов амплитудой 20 кВ с субнаносекундными фронтами (400 пс)¹. В литературе предшествующих десятилетий не так много работ, посвященных вопросам генерирования, передачи, измерения и применения мощных пикосекундных импульсов². На это есть разные причины, но основной из них по-прежнему остаются ограниченные возможности используемой аппаратуры. К настоящему времени исследовательская высоковольтная аппаратура пикосекундного диапазона серийно не производится, существующие установки создаются самими исследователями для решения конкретных задач. Следует отметить, что результаты таких исследований часто становятся основой создания более совершенных источников энергии и измерительной аппаратуры.

Прогресс сильноточных импульсных устройств и появление цифровых осциллографов реального времени с пикосекундным разрешением вывело экспериментальные исследования быстропротекающих процессов на качественно новый уровень. Существующая техника вполне позволяет проводить исследования электроразрядных и эмиссионных процессов длительностью 10^{-10} – 10^{-11} с, решать задачи по генерированию пикосекундных электронных пучков, СВЧ – импульсов электромагнитного излучения пикосекундной длительности и т.п. Как и раньше, эти работы носят одновременно как исследовательский, так и прикладной характер, позволяя создавать новую более совершенную аппаратуру – путь, который несколько раньше прошла наносекундная импульсная энергетика.

При исследовании пикосекундных процессов значительно усложняются проблемы синхронизации работы всех составляющих установки. Следует отметить, что, эта задача так или иначе решается всеми исследователями быстропротекающих процессов, однако при переходе в пикосекундный диапазон проблема синхронизации чаще всего становится основной, и от ее решения зависит успех всей работы. Представленная диссертационная работа посвящена не только решению этих проблем, но и попытке обобщить результаты, сделав их пригодными для широкого круга исследований.

Обычно под общим термином «синхронизация» понимают совмещение, приведение к одному значению нескольких процессов во времени. Это относится

¹ Fletcher R. C. Production and Measurement of UltraHigh Speed Impulses / R. C. Fletcher // Rev. Sci. Instrum. – 1949. – Vol. 20, № 12. – P. 861.

² Месяц А. Г. Пикосекундная электроника больших мощностей / А. Г. Месяц, М. И. Яландин // УФН. – 2005. – Т. 175, №3. – С. 225 – 146.

не только к различным явлениям, но и параметрам одного и того же явления. В частности, подобную задачу приходится решать при совмещении, например, осциллограмм тока и напряжения на одной нагрузке, без точной привязки которых результаты становятся неоднозначными.

Существует множество особенностей синхронизации, определяемых конкретными задачами. В мощной импульсной технике это обычно синхронное управление источниками электрических, электромагнитных или световых импульсов, прецизионный запуск разрядников, инъекция сильноточных электронных пучков и многое др. При этом всегда необходимо учитывать особенности измерительной аппаратуры, зачастую работающей на границе не только технических, но и физических возможностей. Тем не менее, накопленный опыт и современная техника уже сейчас позволяет разработать некоторые универсальные технические решения.

Несмотря на то, что с вопросами синхронизации в той или иной степени сталкивается каждый экспериментатор, эта неизбежная составляющая физического эксперимента относится к тем особенностям, которые слабо отражаются в публикациях, также, как, например, защита от различных помех и наводок. Однако в пикосекундном диапазоне синхронизация становится настолько сложной, что требует разработки специального оборудования и методик, вплоть до использования численного моделирования.

В ИЭФ УрО РАН создан ряд многоцелевых генераторов импульсов напряжения амплитудой до 300 кВ и с фронтами короче 100 пс³. В сочетании с регистрирующей аппаратурой высокого временного разрешения они позволили провести электрофизические эксперименты в области импульсного газового разряда, СВЧ – электроники, лазерной генерации в полупроводниковых кристаллах, исследовать эффекты непрерывного ускорения электронов. Для реализации этих исследований были созданы сложные экспериментальные комплексы, значительную часть которых составили системы синхронизации.

Основной целью данной диссертационной работы является разработка и применение систем пикосекундной синхронизации для решения исследовательских задач в области электрофизики быстропротекающих процессов.

Для достижения поставленной цели были использованы:

1. Методы численного моделирования процессов для точной разработки систем синхронизации.
2. Возможности современной цифровой сверхширокополосной регистрирующей аппаратуры.
3. Многоцелевые компактные импульсные высоковольтные генераторы, разработанные в ИЭФ УрО РАН.
4. Дублирующие методики измерения и контроля исследуемых параметров.

³Шунайлов, С. А. Исследование, разработка и применение многоцелевых малогабаритных сильноточных генераторов нано- и субнаносекундного диапазонов длительностей : дис. ... канд. тех. наук : 01.04.13 : защищена 2.11.99 : утв. 10.12.99 / Шунайлов Сергей Афанасьевич. – Екатеринбург, 1999. – 140 с.

Научная новизна работы заключается в экспериментальных результатах, полученных при проведении электрофизических экспериментов:

1. Разработаны системы синхронизации быстропротекающих процессов, позволившие провести эксперименты по изучению и использованию эффекта сверхизлучения (СИ) в СВЧ диапазоне, исследованию параметров пикосекундных пучков убегающих электронов (УЭ) и генерированию лазерного излучения в полупроводниковых материалах типа A₂B₆ (CdS, ZnSe, ZnCdS и др.).
2. Впервые реализован эксперимент по наблюдению генерации ультракоротких импульсов сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой (38 ГГц) волны накачки на сильноточном релятивистском электронном сгустке.
3. Экспериментально исследованы особенности генерации излучения в полупроводниковых кристаллах с пикосекундным разрешением. Было обнаружено, что в случае воздействия на кристалл электрического поля длительность возникающего излучения составляет 60-100 пс, все процессы протекают вблизи поверхности полупроводника, а излучение имеет сложную временную структуру.
4. Впервые экспериментально определен «момент эмиссии» пучка убегающих электронов на фронте субнаносекундного ускоряющего импульса напряжения в атмосферном промежутке с резко неоднородным полем с предельным разрешением по времени, какое обеспечивалось уровнем цифровой осциллографической техники на момент проведения экспериментов.
5. Впервые экспериментально исследован в лабораторных условиях эффект пробоя воздуха на убегающих электронах. Показано, что в удлиненном разрядном атмосферном промежутке на стадии запаздывания импульсного пробоя последовательно формируются два потока убегающих электронов – первичный пикосекундный пучок УЭ и задержанная лавина вторичных УЭ.
6. Разработанная трехэлектродная конфигурация эмиссионно-разрядного промежутка позволила реализовать метод управления и стабилизации момента эмиссии потоков УЭ с максимальной энергией.

Научная и практическая значимость работы.

Численные расчеты, технические решения и конструкторские разработки позволили получить новые экспериментальные результаты, имеющие фундаментальную и практическую значимость.

1. Результаты, полученные в экспериментах по исследованию потоков УЭ, имеют фундаментальную основу, как новое знание, позволяющее раскрыть особенности быстропротекающих эмиссионных процессов в перенапряженном атмосферном промежутке. В практическом плане появляется возможность получения и применения электронных пучков длительностью ~ 50 пс в воздухе атмосферного давления, например, для калибровки электродинамических трактов и высокоразрешающих приборов, для пикосекундной синхронизации и инициирования процессов в различных исследованиях и др.
2. Генерация излучения в полупроводниковых кристаллах под действием субнаносекундных импульсов высокого напряжения и электронных пучков интересна, как метод получения когерентного излучения в видимом диапазоне

спектра без разрушения полупроводника. Исследование имеет большое значение в плане выяснения особенностей динамики процессов в полупроводниках под действием сильных электрических полей и мощных электронных пучков. В практическом аспекте мощные пикосекундные лазерные импульсы могут применяться в биофизике, медицине и других областях. На основе проведенных исследований создан лабораторный макет компактного генератора пикосекундных лазерных импульсов и получен патент на изобретение.

3. Генерация мощных ультракоротких импульсов при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой (38 ГГц) волны накачки на сильноточном релятивистском электронном сгустке в режиме сверхизлучения была получена впервые. В этом сложном эксперименте была показана реальность наблюдения явления генерации импульсов СИ с умножением частоты рассеиваемой волны, предсказываемой теорией для приборов типа «скаттрон» (от английского «scattering»-рассеяние). Задача требует дальнейших исследований и полученные результаты интересны, прежде всего, с фундаментальной стороны для выяснения возможностей реализации и особенностей различных механизмов вынужденного излучения заряженных частиц. На практике – это перспективный способ получения мощных ультракоротких импульсов высокочастотного электромагнитного излучения для различных применений (например, радиолокация высокого разрешения).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Субнаносекундная точность синхронизации двух высоковольтных ускорителей РАДАН 303, позволила впервые наблюдать эффект генерации ультракоротких импульсов сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки (38 ГГц) на сильноточном релятивистском электронном сгустке с умножением частоты рассеиваемой волны. Рассеянное излучение представляло собой одиночный импульс длительностью ~ 200 пс.

2. Субнаносекундная синхронизация фронта высоковольтного импульса напряжения (200 кВ, 200 пс) со скоростной электронно-оптической камерой с пикосекундным разрешением (10 пс) показала сложную структуру импульса излучения при генерации лазерного излучения в полупроводниковых материалах под воздействием сильного электрического поля: лидирующий пик, длительностью 20 пс возникает перед основным импульсом излучения (60 - 100 пс), а зона свечения локализуется возле поверхности полупроводниковой пластины.

3. Пучок убегающих электронов в атмосферном разрядном промежутке с резко неоднородным полем формируется на субнаносекундном фронте приложенного импульса напряжения, если критическое поле при нарастании напряжения, достигается раньше, чем развивается импульсный пробой. Измеренная минимальная длительность пучка - не более 40 пс.

4. После прохождения пикосекундного иницирующего электронного пучка в удлиненном атмосферном промежутке с сильным полем за сетчатым анодом наблюдается ток лавины вторичных убегающих электронов, и затем с пикосекундной стабильностью развивается пробой. В отсутствие иницирующего пучка пробой развивается значительно медленнее или запаздывает.

Личный вклад автора

Вклад автора в представленную к защите работу состоит в постановке задач, выполнении экспериментов, обработке и интерпретации результатов, а также в непосредственном участии в проектировании и разработке отдельных конструкций систем синхронизации и блоков экспериментальных установок. В частности, автором были сконструированы высоковольтная система синхронизации, разрядные камеры и системы крепления образцов для исследования динамики излучения в полупроводниковых материалах; малогабаритные вакуумные и газовые диоды для компактных ускорителей РАДАН; рассчитаны карты электрических полей высоковольтных электроразрядных промежутков.

Степень достоверности научных результатов

Обоснованность и достоверность результатов исследований определяется использованием комплекса экспериментальных и численных методов исследования сложных явлений, осциллографических и оптических регистраторов процессов с надлежащим разрешением в реальном времени и датчиков электрофизических процессов с адекватными переходными характеристиками. Достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечивается повторяемостью их в одних и тех же условиях. Результаты хорошо воспроизводятся и не противоречат теоретическим представлениям.

Апробация результатов

Результаты работы докладывались на научных семинарах ИЭФ УрО РАН, на российских и международных конференциях: по сильноточной электронике (Россия, Томск 2008, 2010, 2012), по мощным пучкам частиц (Китай 2008, Корея 2010, Германия 2012), по мощной импульсной технике (США 2009, 2011).

Материалы диссертации составили содержание 14 статей, опубликованных в ведущих отечественных и зарубежных журналах, 17 тезисов докладов, изданных в сборниках трудов конференций. По материалам работы получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, и списка цитируемой литературы из 109 наименований. Работа содержит 140 страниц машинописного текста и иллюстрируется 66 рисунками.

Ввиду разнообразия исследуемых электрофизических процессов литературный обзор в работе отдельно не выделен, соответствующий материал изложен в начале каждой главы диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, а также защищаемые положения. Приведены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, личный вклад автора, структура диссертации.

Первая глава посвящена экспериментальным исследованиям возможности генерации ультракоротких импульсов СИ в процессе вынужденного обратного комптоновского рассеяния волн на встречно движущемся релятивистском электронном сгустке.

В начале главы приведен краткий литературный обзор явления сверхизлучения электронных ансамблей на основе различных механизмов индуцированного излучения в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн. В более коротковолновых диапазонах, генерация ультракоротких импульсов может быть осуществлена с использованием механизма СИ, который рассматривается в данной главе.

В основе эксперимента лежала многоуровневая синхронизация устройств и физических процессов различной длительности, от миллисекундной до пикосекундной. Здесь конкретной исследовательской задачей была экспериментальная реализация синхронного встречного взаимодействия электронного пучка и СВЧ – волны, т.е. эффективного рассеяния волны на электронах пучка. Для этого был проведен комплекс электродинамических и электротехнических расчетов, обеспечена синхронная работа импульсных генераторов, были учтены переходные процессы формирования электронного пучка и СВЧ – волны накачки, а также время распространения их по волноводным трактам. Только успешное решение всего комплекса задач позволило впервые экспериментально наблюдать указанный механизм сверхизлучения и зарегистрировать одиночные импульсы СИ пикосекундной длительности (~ 200 пс) с высокочастотной границей спектра ~ 150 ГГц - более чем в 3 раза превышающей частоту накачки (~ 38 ГГц) [1].

В главе приводится описание и принцип работы экспериментальной установки (рис.1), которая представляет собой довольно сложный комплекс на основе синхронизованных с субнаносекундной точностью двух сильноточных ускорителей РАДАН 303, формирующих электронные пучки наносекундной и субнаносекундной длительности. Первый ускоритель генерировал СВЧ – импульс волны накачки 38 ГГц с длительностью ~ 4 нс, который подавался в пространство взаимодействия и испытывал встречное рассеяние на релятивистских электронах (энергия >250 кэВ) субнаносекундного (0.6 нс) пучка, формируемого вторым ускорителем.

Импульсные генераторы запускались внешним субнаносекундным пусковым генератором через коаксиальные масляные высоковольтные линии, подбором длин которых в конечном итоге и обеспечивалась синхронная встреча электронного пучка и СВЧ – волны в пространстве взаимодействия (круглый вакуумированный волновод с наложенным продольным магнитным полем).

В качестве СВЧ – генератора накачки (7) использовался малогабаритный карсинотрон - релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ), генерирующая мощную (~ 100 МВт) волну типа E_{01} миллиметрового диапазона ($\lambda_i \sim 8$ мм) длительностью ~ 4 нс с частотой излучения 38 ГГц. С помощью электродинамического преобразователя типа волны СВЧ – излучение преобразовывалось в волну H_{11} , а затем – в волновой пучок, близкий по структуре к гауссовому и поступало на рупорную антенну (6). Передача волны накачки в секцию рассеяния (4) и вывод рассеянного излучения во внешнее пространство осуществлялись с помощью квазиоптического параболического зеркала (10) и

системы рупорных антенн (5, 6), расположенных относительно друг друга под углом 45° .

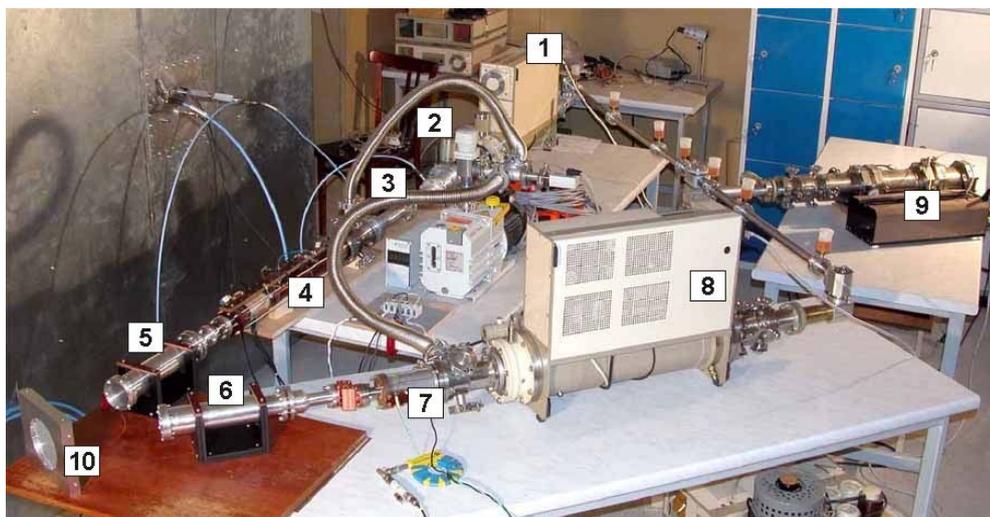


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки. 1 и 8 – импульсные генераторы РАДАН 303, 2 – система компрессии, 3 – передающая линия, 4 – зона рассеяния, 5 и 6 – рупорные антенны, 7 – СВЧ-генератор волны накачки, 9 – пусковой генератор.

В секции рассеяния (4), представляющей собой участок гладкого волновода длиной ~ 40 см, волна накачки длительностью ~ 4 нс и мощностью ~ 100 МВт распространялась навстречу сильноточному ($250 - 300$ кэВ, $1 - 1.5$ кА) субнаносекундному (~ 600 пс, длительность на полувысоте) электронному пучку, формируемому вторым ускорителем.

В канале скаттрона (как и в канале СВЧ – генератора) также использовался коаксиальный сильноточный вакуумный диод с магнитной фокусировкой (магнитное поле фокусирующего соленоида ~ 24 кЭ), который являлся конечной нагрузкой генератора импульсов ускоряющего напряжения. Диод формировал тонкостенный (0.1 мм) трубчатый релятивистский электронный пучок диаметром 5 мм, распространяющийся непосредственно в секции рассеяния навстречу электромагнитной волне накачки.

Высокочастотное рассеянное излучение через рупорную антенну (5) и перфорированный СВЧ – рефлектор (10) поступало на детектор, сигнал с которого регистрировался осциллографом.

Таким образом, для синхронной работы установки и выполнения задачи эксперимента было сделано следующее:

- обеспечен синхронный запуск с соответствующими задержками следующих устройств: импульсных генераторов, источников питания фокусирующих соленоидов и СВЧ – детектора; это было достигнуто с помощью комплекса, составленного из серийных генераторов ГИ–1, Г5–54 и Г5–63. Генераторы обеспечивают точность межканальной синхронизации низковольтных управляющих импульсов ($10 - 300$ В) в диапазоне $10 - 100$ нс.

- определено время переходного процесса СВЧ–генератора (ЛОВ), формирующего рассеиваемую электромагнитную волну. Для этого был проведен расчет динамики формирования СВЧ – импульса с помощью компьютерного кода «КАРАТ»⁴. Методом крупных частиц решалась нестационарная электродинамическая задача энергообмена между электронами пучка и синхронной электромагнитной волной (первой обратной пространственной гармоникой волны E_{01}), которая возбуждается в замедляющей системе ЛОВ. Из результатов численного моделирования была выбрана задержка ~ 4 нс для обеспечения взаимодействия рассеиваемой СВЧ–волны с встречным электронным пучком.
- рассчитано время задержки, возникающее при распространении электромагнитной волны по волноводным трактам в зону рассеяния. Проводился аналитический расчет на основании геометрических параметров волноводных трактов (выходной тракт СВЧ – генератора имел радиус 0.65 см и для вывода излучения в свободное пространство плавно переходил в рупорную антенну с радиусом апертуры 2.5 см). Расчеты показали, что групповая скорость волны на рабочей частоте генератора накачки 38 ГГц мало ($<10\%$) отличается от скорости света c . Эти выводы были подтверждены с помощью численного моделирования (код «КАРАТ») передачи СВЧ – импульса частотой 38 ГГц на отрезке расширяющегося конического волновода круглого сечения.
- определена задержка формирования ускоряющего импульса напряжения в устройстве компрессии, которое установлено на выходе импульсного наносекундного генератора (в канале ускорителя, генерирующего рассеивающий субнаносекундный электронный пучок). С помощью компьютерного моделирования с использованием кода «КАРАТ» продемонстрировано, что формирование выходного импульса (300 кВ, ~ 1 нс) происходит с задержкой ~ 3 нс относительно фронта преобразуемого.
- для того чтобы учесть все временные задержки, вносимые различными приборами и устройствами и обеспечить синхронную подачу рассеиваемой СВЧ – волны в область взаимодействия с рассеивающим электронным пучком в момент инжекции фронта этого пучка в зону энергообмена был сделан расчет баланса временных задержек. В соответствии с этим расчетом были выбраны длины пусковых коаксиальных трактов так, что их разница в точке Т – образного расщепления пускового импульса составила около 40 см то есть соответствовала 2 нс (временная разность).

В главе приводятся результаты экспериментальной работы. Самым важным результатом исследований была регистрация рассеянного импульса СИ и подтверждение факта увеличения частоты излучения. Наблюдение рассеянного излучения происходило с помощью детектора и осциллографа TDS6604. Учитывалось, что ограниченная аналоговая полоса (6 ГГц) и скорость цифровых отсчетов (20 Gs/s) осциллографа существенно искажают форму субнаносекундного сигнала детектора.

⁴ Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT / V. P. Tarakanov. – Berkeley Research Associates, Inc., VA, USA, 1992

По сигналам с детектора (рис.2), интегральная по спектру мощность в пике излучения оценочно достигала значений до 1 МВт.

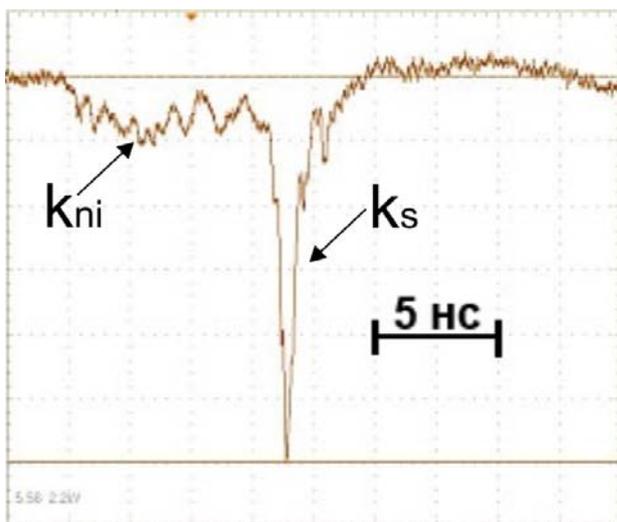


Рис. 2. Сигнал детектора, наблюдаемый при включенных рассеивающем пучке и волне накачки, определяемый сдвинутыми по времени гармонической составляющей волны накачки k_{ni} и рассеянным излучением k_s .

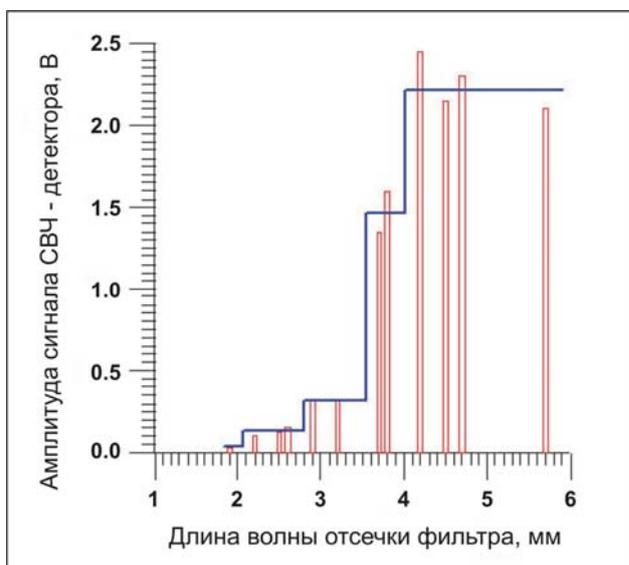


Рис. 3. Спектральная характеристика рассеянного излучения.

В начале главы приведен краткий обзор о полупроводниковых стримерных лазерах при наносекундной накачке⁵ и описаны преимущества и возможности при

Спектральный состав регистрируемого рассеянного излучения (рис.3) был определен с помощью набора калиброванных фильтров высоких частот (запредельных волноводов), которые включались в волноводный тракт между приемной рупорной антенной и СВЧ – детектором.

В спектре рассеянного излучения присутствуют выраженные колебания с длиной волны около 2 мм, близкой к расчетной. Кроме того, явно выражено наличие сигнала в диапазонах длин волн (2 ÷ 2.8 мм); (2.8 ÷ 3.5 мм); (3.5 ÷ 4.2 мм); (4.2 → 8 мм). Многомодовый характер спектра связан с тем, что зона рассеяния представляла свехразмерный волновод, где могут распространяться колебания различных частот, а методов селекции колебаний не предусматривалось.

Во второй главе приводятся экспериментальные исследования и анализ поведения полупроводников под действием высоковольтных пикосекундных импульсов электрического поля и электронных пучков. Работа проводилась в Институте электрофизики УрО РАН совместно с лабораторией полупроводниковых лазеров Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва).

⁵ Генерация света в полупроводниках и диэлектриках, возбуждаемых электрическим полем / Н. Г. Басов, А. Г. Молчанов, А. С. Насибов, А. З. Обидин, А. Н. Печенов, Ю. М. Попов // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19, Вып. 10. – С. 650 – 654.

применении пикосекундных импульсов для возбуждения полупроводниковых структур. Это новый метод генерации когерентного электромагнитного излучения в полупроводниках с точки зрения длительности применяемой накачки. Приведены данные о первых работах при воздействии на полупроводниковые кристаллы субнаносекундных импульсов высокого напряжения и электронных пучков⁶ [2].

В начале главы описаны перспективные области применения мощных пикосекундных лазерных импульсов и очерчены проблемы измерения и анализа динамики таких коротких излучательных процессов. Прежде всего показана ограниченность применения оптических датчиков, которые имеют переходные характеристики в диапазоне 0.1–0.5 нс и не позволяют регистрировать процессы с характерными временами короче 100 пс.

Для того чтобы решить эту проблему, был использован высокоскоростной фоторегистратор (стрик – камера), представляющий собой электронно-оптический преобразователь (ЭОП) со щелевой разверткой. Стрик – камера позволяет исследовать оптические процессы с пикосекундной точностью в реальном режиме времени. Другой трудностью в этом направлении стало требование необходимости стабильного наносекундного опережающего импульса запуска камеры относительно исследуемого процесса с пикосекундной привязкой к фронту импульса напряжения на исследуемом промежутке. Необходимая задержка определяется т.н. “мертвым временем” камеры (время выхода ЭОП на режим). Эта задача была решена с помощью разработанных нами систем синхронизации.

В главе приводится описание и принцип работы двух экспериментальных установок с использованием различных систем синхронизации – высоковольтной и волоконно-оптической [3-5], которые были разработаны и созданы нами для исследования быстропротекающих процессов в электроразрядных промежутках.

Обе установки состоят из одинаковых функциональных устройств: импульсный генератор РАДАН 303, испытательная камера для образцов, электронно – оптическая камера с персональным компьютером и линия задержки. В одном случае это высоковольтная коаксиальная линия длиной 5 м, что обеспечивало задержку подачи импульса напряжения на катод испытательной камеры – 25 нс. В другом, это специально сконструированная многоканальная волоконно-оптическая система, которая обеспечивала подачу исследуемого импульса излучения на фотокатод стрик – камеры с соответствующими задержками относительно момента запуска камеры. Обе системы позволили синхронизовать изучаемый процесс со стрик – камерой. У каждой из систем есть свои преимущества и недостатки, которые описаны в главе.

В качестве электронно – оптического регистратора использовалась стрик – камера фирмы CORDIN mod. 173. Волоконно-оптическая система была специально разработана и изготовлена в Научном центре волоконной оптики РАН (ИЦВО РАН). В качестве мишеней использовались широкозонные полупроводниковые кристаллы.

⁶ Люминесценция и генерация лазерного излучения в монокристаллах селенида цинка и сульфида кадмия под действием субнаносекундных импульсов высокого напряжения / Г. А. Месяц, А.С. Насибов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 133, Вып. 6. – С. 1162 – 1168.

Одной из центральных задач исследования было осуществить пикосекундную привязку исследуемого оптического процесса и высоковольтного импульса напряжения. Это было реализовано с помощью реперного искрового микрозазора, который был встроен перед катодом на расстоянии 12 мм (рис.4,г).

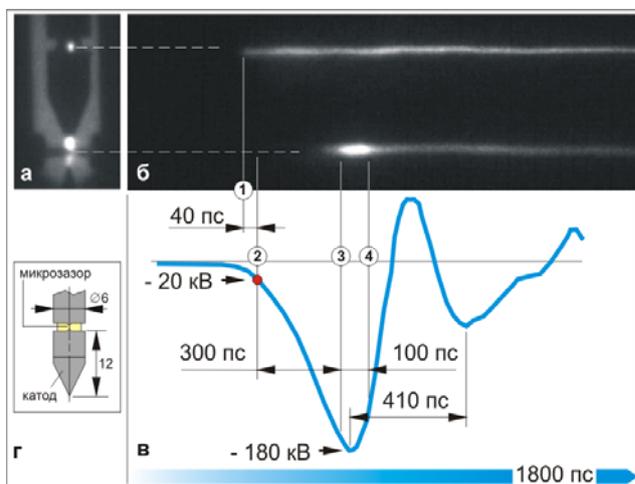


Рис. 4. Фотохронограмма развития свечения пластины ZnSe (1 мм) снятая с боковой стороны пластины. а - статическая фотография разряда в «реперном» промежутке и в зазоре между электродами с установленной мишенью; б – развертка процесса свечения: в «реперном» разряднике (1); в зазоре между электродами (2); в пластине ZnSe (3-4); в - расчетный импульс напряжения на катоде в привязке к фотохронограмме излучения пластины ZnSe; г – конструкция «реперного» микрозазора. Съёмка (б) на развертке 1.8 нс.

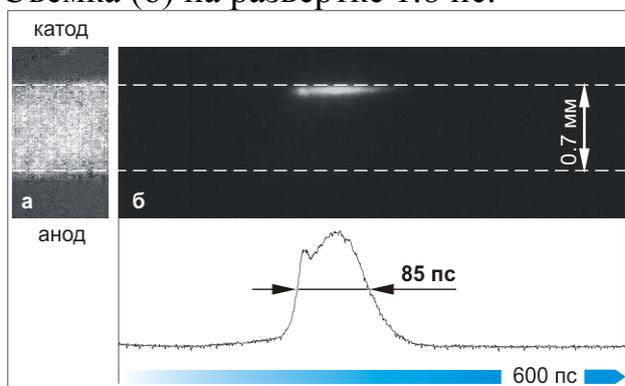


Рис. 5. Фотохронограмма развития свечения ZnSe (толщина 0.7 мм) со стороны боковой грани пластины (б), фото пластины (а).

Свечение такого щелевого разрядника использовалось в качестве реперной точки на развертке стрик-камеры. На рис.4 показан результат синхронизации импульса напряжения и момента появления генерации в кристалле ZnSe на развертке 1.8 нс. Из фотохронограммы видно, что генерация излучения имеет пороговый характер и связана с появлением импульса напряжения на кристалле. Какого-либо свечения пластины, сравнимой по интенсивности с генерацией в отсутствие импульса напряжения (послесвечение), не наблюдалось.

В главе приводятся результаты исследования динамических, спектральных, энергетических характеристик излучения в полупроводниковых пластинах под действием пикосекундных импульсов высокого напряжения и электронных пучков

При воздействии пикосекундных импульсов напряжения (50 – 100 кВ, 150 – 250 пс) наиболее часто использовались пластины ZnSe и CdS. На рис.5 представлена фотохронограмма области свечения ZnSe со стороны боковой грани пластины. Максимальные значения электрических полей сдвинуты в область катода: расстояние от катода до пластины – 0.2 мм, от анода до пластины – 0.75 мм. Импульс излучения длительностью 85 пс на полувысоте возникал у поверхности пластины ZnSe со стороны катода.

Полученные результаты дали возможность определить поведение

полупроводниковых кристаллов при сверхкоротком мощном возбуждении. Прежде всего, из полученных данных выделяется сложная временная структура излучения. Практически на всех фотохронограммах присутствует лидирующий пик длительностью 15–20 пс, а уже затем возникает основной импульс излучения длительностью 60–100 пс. Другим зарегистрированным фактом является поверхностная локализация зоны возбуждения в полупроводниковой пластине.

Изначально предполагалось, что генерация излучения при пикосекундной накачке имеет стримерный характер, как и при возбуждении импульсами наносекундной длительности. Но проведенные эксперименты показали, что стримерный механизм возбуждения не может объяснить вышеуказанные факты. Мы предполагаем, что в условиях данных экспериментов необходимо учитывать эффект непрерывного ускорения электронов. То есть, в атмосферном промежутке формируется пучок УЭ, ответственный за появление лидирующего пика (~20 пс), затем происходит пробой промежутка и генерируется основной импульс излучения в полупроводнике (~100 пс). Таким образом, пучок УЭ может быть причиной возникновения лидирующего пика и являться иницирующим фактором, но сам по себе не определяет природу возникновения излучения в полупроводниковой мишени в целом.

Также были получены спектральные характеристики и измерена мощность излучения в импульсе. Спектры представляют собой узкие пики шириной 3–10 нм. Оценки мощности излучения для образцов без отражающих покрытий дают значения ~1 – 2 кВт. Максимальная измеренная мощность генерации в импульсе составила 6 кВт для образца ZnSe толщиной 1 мм, на одну сторону которого было нанесено диэлектрическое зеркальное покрытие с коэффициентом отражения $R=0.95$.

При исследовании генерации излучения полупроводниковых кристаллов под действием электронных пучков пикосекундной длительности использовались лазерные элементы (ЛЭ), изготовленные из широкозонных полупроводниковых соединений A_2B_6 (CdS – CdSe, CdS, ZnSe, ZnO, ZnSe – ZnS, ZnSSe, ZnCdS, CdS). Конструктивно ЛЭ выполнен из сапфирового диска диаметром 50–60 мм на котором закреплена тонкая (~20 мкм) монокристаллическая полупроводниковая пленка с нанесенными отражающими покрытиями, образующими оптический резонатор. Сильноточный пикосекундный электронный пучок (длительность ~300 пс, плотность тока до 800 А/см²) попадал на образец через коллиматор с диаметром отверстия ~1 мм.

На рис.6 показана фотохронограмма излучения лазерного элемента CdS. В лазерном элементе генерируется импульс излучения длительностью ~120–150 пс с фронтом ~15–40 пс. Оценки мощности дают значения 10–12 кВт в импульсе. Спектр излучения также представляет собой узкий пик шириной 7 – 10 нм. Расходимость излучения не превышала 5°.

Полученные результаты исследований позволили создать лабораторный макет компактного генератора лазерных импульсов пикосекундной длительности (рис.7) [6]. Для разработанного опытного образца получен патент на изобретение [7].

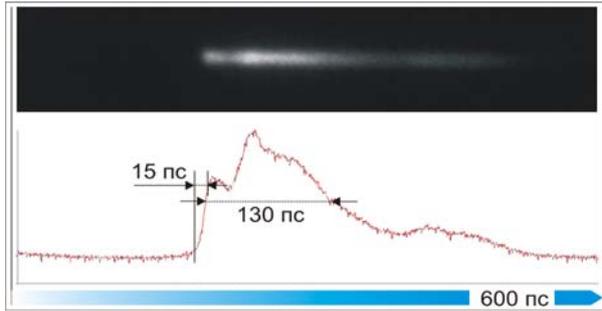


Рис. 6. Фотохронограмма генерации лазерного излучения на лазерном экране CdS.



Рис. 7. Компактный малогабаритный импульсный генератор.

Третья глава посвящена исследованию эффекта непрерывного ускорения (убегания) электронов в сильно перенапряженных газовых промежутках. Характерным масштабом процессов непрерывного ускорения являются длительности в десятки пикосекунд. Исследовать это явление экспериментально в реальном времени стало возможно только в последнее десятилетие.

В начале главы приведен краткий обзор, посвященный теоретическим и экспериментальным работам в области изучения явления непрерывного ускорения электронов, а также описаны условия, при которых реализуется механизм убегания⁷. Суть эффекта заключается в том, что электрон становится убегающим, если, ускоряясь в электрическом поле, он приобретает больше энергии между неупругими столкновениями с молекулами газа, чем расходует на ударную ионизацию.

В ИЭФ УрО РАН работы по исследованию УЭ, ведутся с 2006 года по настоящее время. В начале главы также представлен обзор цикла экспериментальных работ, которые позволили получить ряд ключевых результатов о природе УЭ и их роли в инициации импульсного газового разряда. Эксперименты, представленные в настоящей главе, были логическим продолжением этого цикла работ.

В проведенных исследованиях основной и принципиальной задачей было определение с пикосекундной точностью момента эмиссии пучка УЭ по отношению к импульсу ускоряющего напряжения, то есть определение таких значений напряжения, при которых происходит формирование пучка УЭ (электроны из прикатодной плазмы уходят в режим «убегания»). Фактически требовалось с пикосекундной точностью синхронизовать короткий импульс тока УЭ с соответствующим моментом на более длинном импульсе напряжения на катоде. Если в эксперименте этот вопрос не решён, то фактически не определено напряжение, при котором происходит эмиссия УЭ. В результате оказываются под сомнением подходы и факты из области исследований инициирования, динамики и энергетических характеристик потоков УЭ, их роль в развитии импульсного пробоя и т.п. Для выполнения этой нетривиальной задачи было разработано

⁷ Королев Ю.Д. Физика импульсного пробоя газов / Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц. – М.: Наука, 1991. – 224 с.

несколько методик, сочетающих экспериментальные данные и численные расчеты [8-11].

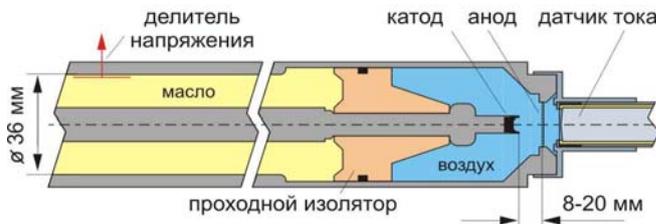


Рис. 8. Типичная схема выходного блока экспериментальной установки для исследования характеристик пикосекундных пучков УЭ, формируемых в газовом электродном промежутке с резко неоднородным полем.

(типичные рабочие зазоры 8 и 20 мм). За анодом устанавливался коллекторный датчик электронного тока с переходной характеристикой не хуже 30 пс, сигналы с которого поступали непосредственно на цифровой осциллограф (Tektronix TDS6154C) по широкополосному кабелю (Times – Microwave SFT – 304, частота отсечки 23 ГГц).

На катод подавались высоковольтные импульсы по коаксиальной передающей линии от пикосекундного генератора на базе импульсного наносекундного драйвера РАДАН 303

В основной части главы приводится описание методов определения области формирования пучка УЭ по отношению к фронту ускоряющего импульса напряжения и полученные результаты.

Более простой способ оценки области эмиссии пучка УЭ – метод «дисперсии» [8]. Это фактически прямой метод измерения, использующий высокую стабильность запуска современных цифровых осциллографов. Суть определения момента инжекции УЭ состоит в поиске минимума дисперсии временной задержки между варьируемой точкой запуска осциллографа на нестабильном фронте ускоряющего импульса и определенной точкой на фронте тока пучка УЭ. На рис.9 представлена характерная осциллограмма при измерениях.

На рис.10 представлены данные измерений для зазора 8 при вариации уровня запуска осциллографа. Представлены значения полного разброса (δt) измеряемого интервала времени Δt и дисперсии этой величины (σ_t), усреднённые для каждого значения напряжения по 5 пакетам, состоящих из 50 импульсов каждый. Зависимости имеют явно выраженные минимумы (для зазора 8 мм) при напряжении ~ 130 кВ. Такие же зависимости были получены для зазора 20 мм.

Метод дисперсии позволил фактически определить «верхнюю» границу напряжений эмиссии УЭ, то есть, когда эмиссия электронов уже закончилась.

Разрядный промежуток (рис.8) образован трубчатым катодом из графита (МПГ-6) или нержавеющей стали (12X18Н10Т) диаметром 6 мм с острой кромкой (0.2 – 0.4 мкм) и плоским сетчатым анодом (12X18Н10Т, проволока диаметром 30 мкм, геометрическая прозрачность сетки $\sim 50\%$) или анодом, выполненным из фольги (AlBe или Al). Величина межэлектродного расстояния анод - катод могла плавно регулироваться непосредственно в ходе проведения экспериментов

Другой метод, сочетающий эксперимент и численное моделирование позволил также определить «верхнюю» границу напряжений эмиссии. УЭ и подтвердить достоверность результатов, полученных методом «дисперсии». Суть метода заключалась в следующем, для ускоряющего импульса с максимальной амплитудой, экспериментально определялась верхняя граница энергий УЭ по порогу отсечки фильтрами различной толщины. Затем методами численного расчета моделировался старт пробных частиц в области напряжений до

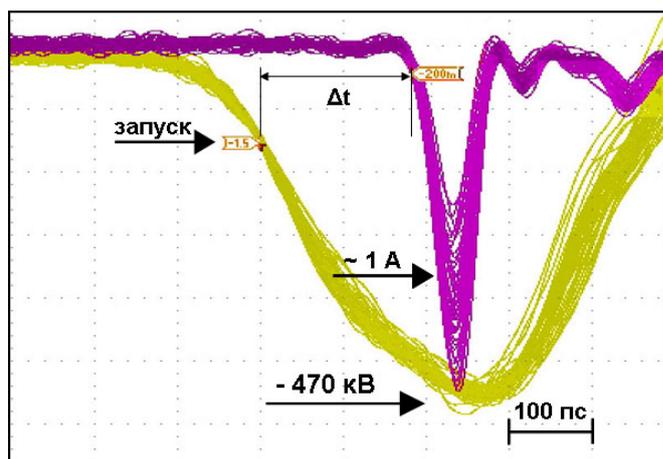


Рис. 9. Характерная осциллограмма в режиме накопления при измерении тока УЭ и задержки момента инжекции (Δt) относительно фиксированного уровня запуска осциллографа на фронте ускоряющего импульса напряжения (в пакете 50 импульсов).

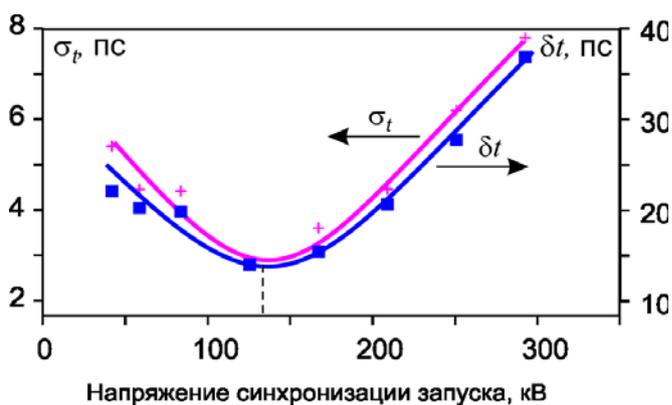


Рис. 10. Абсолютные значения дисперсии (σ_t) и полного разброса (δt) времени задержки момента инжекции УЭ для зазора 8 мм.

предполагаемой верхней границы эмиссии УЭ на фронте ускоряющего импульса, при этом экспериментально определенная энергия отсечки тока УЭ сравнивалась с расчётной энергией частиц для режима свободного ускорения [10-11].

На рис.11 показана кривая ослабления тока УЭ при увеличении толщины фильтра и максимальной амплитуде ускоряющего импульса на катоде в режиме холостого хода (- 570 кВ). Зазор катод – анод при этом составлял 8 мм. Полная отсечка тока наступала при толщине фильтра 210 мкм. То есть, максимум энергии УЭ, в наших условиях составил ~200 кэВ.

В расчётной модели пробные частицы стартовали на фронте импульса (рис. 12,а) при напряжениях до - 145 кВ, т.е. на предполагаемой верхней границе эмиссии, определенной по вышеописанной методике (метод дисперсии) для данных условий эксперимента. Численное моделирование показало согласие экспериментальных результатов с расчетными данными (рис. 12,б). Согласно этим расчетам, максимальную энергию в 200 кэВ приобретет пробный электрон, стартовавший при напряжении -145 кВ.

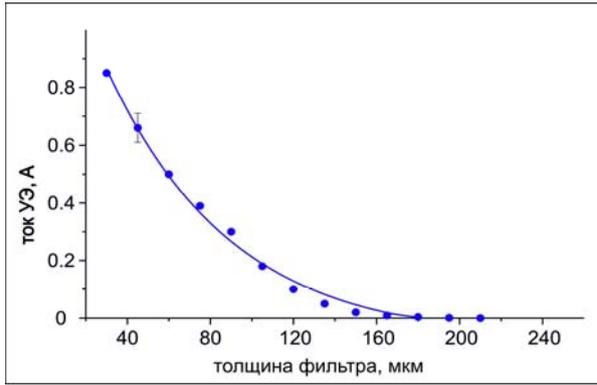


Рис. 11. Ослабление тока УЭ при изменении толщины алюминиевого фильтра. Ускоряющий импульс амплитудой на катоде - 570 кВ.

экспериментальная зависимость тока пучка УЭ от амплитуды напряжения для зазора катод – анод 8 мм. Амплитуда ускоряющего импульса плавно снижалась до тех пор, пока ток УЭ не исчез полностью. Это произошло при напряжении на катоде – 74 кВ. Таким образом, можно выделить нижнюю границу напряжений, где начинается эмиссия УЭ (-74 кВ).

Совокупность полученной информации о нижней и верхней границах напряжений, при которых эмитируются убегающие электроны, дает полный временной интервал генерации пучка УЭ. Для зазора 8 мм эта область фронта ускоряющего импульса на рис.14,а выделена специально и по основанию составляет всего 47 пс. Численное моделирование показало (рис.14,б), что если такой пучок, ускоряясь в динамически нарастающем поле, пройдет весь зазор, то на аноде его длительность по основанию будет ~26 пс. Это как раз то, чего мы не видим экспериментально из-за ограниченной полосы частот осциллографа.

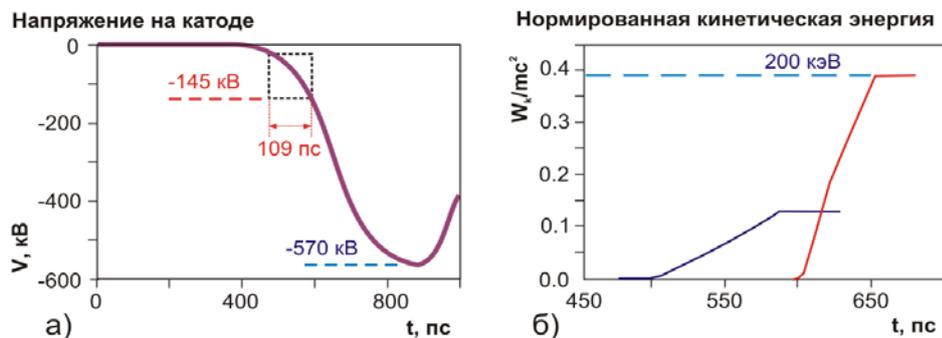


Рис. 12. (а) – численное моделирование доставки к катоду импульса напряжения с амплитудой –570 кВ. Выделена область инжекции пробных частиц длительностью 109 пс; (б) – расчёт динамики набора энергии пробных частиц, стартовавших из крайних точек области инжекции.

Достоверность полученных данных проверена при увеличении ускоряющего промежутка - зазор катод – анод был увеличен с 8 до 20 мм. Это должно было изменить верхний порог напряжения эмиссии пучка УЭ, что и было подтверждено как экспериментально, так и с помощью расчетов [10-11].

Также в главе описана методика плавного снижения амплитуды ускоряющего напряжения, позволяющая сделать оценку нижнего порога напряжений эмиссии УЭ.

На рис.13 показана

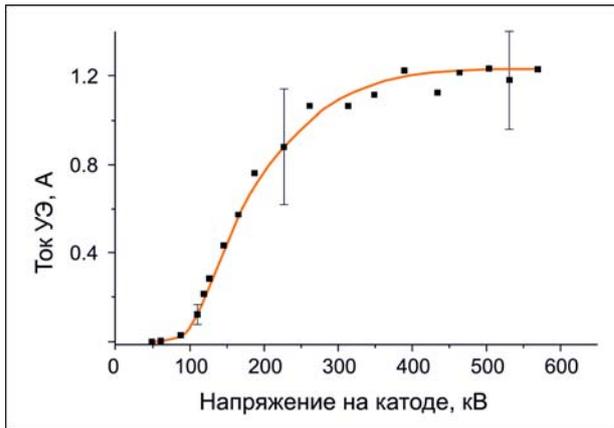


Рис. 13. Зависимость усреднённой амплитуды тока УЭ (по 50 импульсам в каждой точке), прошедшего через фиксированный алюминиевый фильтр 15 мкм (экран коллектора токового датчика пучка) при вариации амплитуды ускоряющего импульса на катоде.

[12-15]. Эти работы были проведены при сотрудничестве с коллегами из Физического института им. П.Н. Лебедева в рамках изучения явления пробоя на УЭ (ПУЭ)⁸ в лабораторных условиях.

Используя значение нижнего порога напряжений эмиссии и геометрию электродного промежутка, было рассчитано критическое электрическое поле на кромке катода, когда начинается эмиссия УЭ [8].

Полученные данные проверялись при увеличении зазора катод – анод с 8 до 20 мм. Согласно измерениям и расчетам, нижний порог напряжения эмиссии сместился до -84 кВ [11].

В конце третьей главы приводится раздел, посвященный экспериментальным исследованиям формирования пучков УЭ в удлинённых (~ 20 мм) атмосферных промежутках при сильном перенапряжении на стадии запаздывания импульсного пробоя

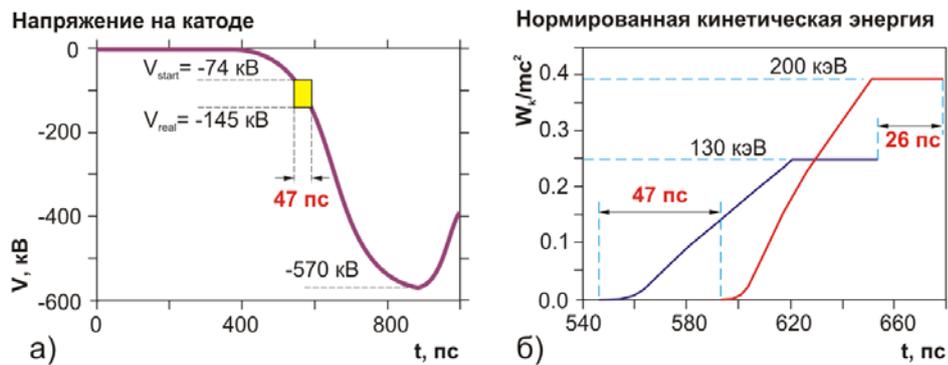


Рис. 14. (а) - Численное моделирование доставки к катоду импульса напряжения с амплитудой -570 кВ. Выделена область напряжений инжекции пробных частиц длительностью 47 нс, ограниченная порогами начала эмиссии УЭ и обрыва пучка; (б) – расчёт динамики набора энергии пробными частицами из крайних точек области инжекции УЭ и компрессии длительности пучка по основанию токового импульса с 47 нс до 26 нс при прохождении частицами расстояния от области инжекции до точки регистрации датчиком.

⁸ Гуревич А. В. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы / А. В. Гуревич, К. П. Зыбин // УФН. – 2001. Т. 171. – Р. 1177 – 1199.

Пикосекундные процессы здесь протекают следующим образом: сначала в усиленном поле возле катода эмитируется первичный пучок УЭ. Затем, ускоряясь в основном промежутке при сильном остаточном поле он за счёт ударной ионизации генерирует вторичные электроны, которые также могут убегать и, таким образом, формируют лавину УЭ. Эти процессы с пикосекундной точностью влияют на скорость развития последующего импульсного пробоя.

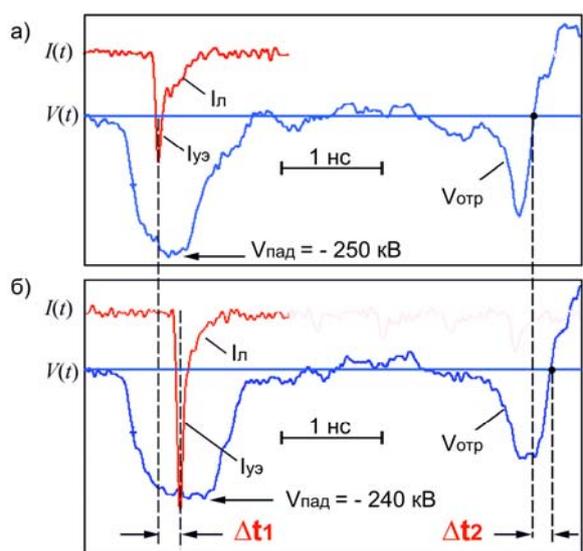


Рис.15. Осциллограммы импульсов напряжения: падающего ($V_{пад}$) и отражённого ($V_{отр}$) от разрядного промежутка. Вариация положения импульса тока убегающих электронов $I_{уэ}$ за анодом при изменении амплитуды $V_{пад}$.

На рис.15 представлена рефлектограмма, демонстрирующая роль УЭ в развитии пробоя. Можно сделать вывод, что поток УЭ «синхронизует» последующий пробой. Это видно из равенства смещений момента эмиссии УЭ (Δt_1) и момента пробоя промежутка (Δt_2) $\Delta t_2 = \Delta t_1$. Из-за нестабильности напряжения момент эмиссии УЭ вблизи амплитудного напряжения случайным образом менялся (Δt_1). Смещение момента пробоя (Δt_2) оценивалось по точке смены полярности отражённого сигнала $V_{отр}$. В этот момент в промежутке уже протекает разрядный ток в несколько килоампер. Были отмечены задержки до $\Delta t_2 = \Delta t_1 \approx 200 \div 300$ пс с точностью < 10 пс.

Слабый ток УЭ не может вызвать ощутимого спада напряжения в промежутке и здесь на первый план выходят процессы в лавине, где также возникает много низкоэнергетичных

электронов, образующих проводящую среду для пробоя.

В специальных экспериментах [15] был показан метод управления моментом эмиссии УЭ. Эмиссия УЭ начинается, когда возле катода достигается критическое значение электрического поля $E_{кр} \sim 500$ кВ/см. Таким образом, меняя условия достижения $E_{кр}$ можно управлять моментом эмиссии. Это достигается за счёт вариации положения металлического катодного усилителя поля (например, игла) и/или радиуса кривизны его кромки при неизменных параметрах импульса напряжения (фронт, амплитуда).

Из-за нестабильности амплитуды высоковольтных субнаносекундных импульсов потоки УЭ в удлинённых атмосферных промежутках могут формироваться в двух типичных режимах. Первый случай, когда УЭ эмитируются стабильно по времени на начальном участке фронта импульса напряжения. Тогда они ускоряются в динамически нарастающем поле и приобретаемая ими кинетическая энергия будет ниже максимально возможной. Это происходит потому, что время ускорения УЭ меньше длительности фронта импульса напряжения. Во втором случае, когда УЭ эмитируются вблизи перехода фронта

импульса в полку, можно получать большие энергии частиц, но стабильность эмиссии по времени здесь плохая (рис.15).

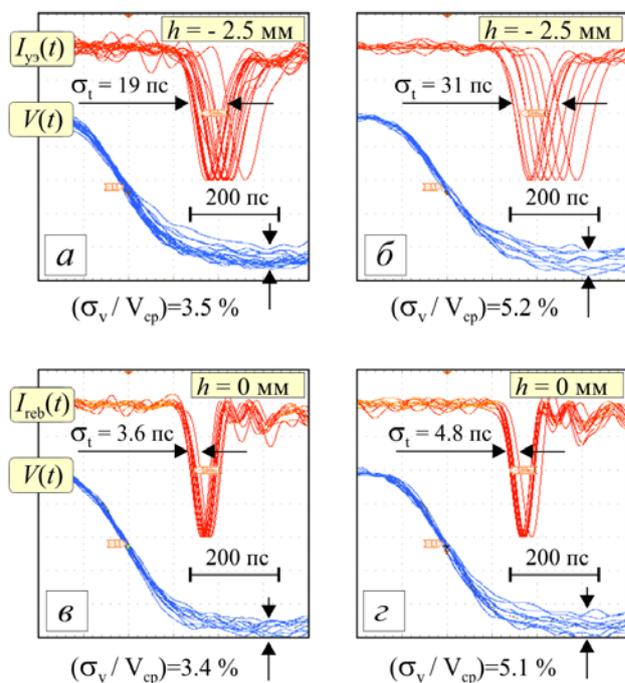


Рис.16. Стабильность эмиссии УЭ по времени при вариации разброса амплитуды ускоряющего напряжения: а,б – двойная электродная система, в,г – трёхэлектродная конфигурация. Режим регистрации тока УЭ – автонормирование амплитуды.

Для того, чтобы получить стабильную эмиссию УЭ с максимально возможной энергией нами была разработана трехэлектродная конфигурация разрядного промежутка [15]. Зазор разделен на две части дополнительным электродом под плавающим потенциалом, геометрически совпадающим с эквипотенциальной поверхностью так, чтобы на зазорах выполнялось $V_1 < V_2$.

В трехэлектродном зазоре происходит следующее: УЭ эмитируются на крутом участке фронта в первом зазоре. В этих условиях эмиссия УЭ стабильна. Затем пучок УЭ во втором зазоре ускоряется до максимальных энергий. Однако, для того чтобы обеспечить максимальное напряжение V_2 на втором зазоре к моменту пролета пучка, подача напряжения V_1 на первый зазор (то есть момент эмиссии УЭ) была задержана с помощью диэлектрической изоляции внутренней линии с $\epsilon \approx 2.2$.

В варианте с двухэлектродным зазором максимальная энергия УЭ ~ 350 кэВ обеспечивается в результате эмиссии пучка вблизи перехода фронта напряжения в полку. Это получается из-за значительного заглубления катодного усилителя поля ($h = -2.5$ мм). Данный режим при вариации стандартного отклонения амплитуды напряжения $\sigma_v = 3.5-5.2\%$ (рис.16,а;б) оказывается существенно нестабильным по времени эмиссии УЭ: $\sigma_t = 19-31$ пс.

В трёхэлектродной системе было выбрано $h = 0$ мм. Поле $E_{кр}$ достигалось на усилителе при напряжении, значительно меньшем V . Ускорение УЭ в зазоре d_2 происходило уже при максимальном напряжении V_2 . В результате, в том же диапазоне значений $\sigma_v = 3.4-5.1\%$, временная нестабильность эмиссии потока УЭ была снижена до $\sigma_t = 3.6-4.8$ пс (рис.16,в;г). При этом была получена практически максимальная возможная энергия частиц ~ 370 кэВ.

Дальнейшие исследования эффектов синхронизации эмиссии УЭ при давлении выше атмосферного могут быть принципиальными для стабилизации напряжения и времени пробоя субнаносекундных разрядников-обострителей.

В заключении описаны основные результаты и выводы:

1. На основе теоретических и численных расчетов, конструкторских и технологических разработок, а также с использованием имеющейся в лаборатории аппаратуры было создано несколько экспериментальных комплексов и проведены электрофизические эксперименты по исследованию таких быстропротекающих процессов как, генерация импульсов микроволнового сверхизлучения, генерация излучения полупроводников в сильном электрическом поле и под действием электронных пучков, а также явление убегания электронов в воздухе в резко-неоднородном электрическом поле.
2. Впервые реализовано встречное рассеяние мощной СВЧ – волны (38 ГГц) с умножением частоты на электронах релятивистского пучка (250-300 КэВ) в режиме сверхизлучения. Полученное рассеянное излучение представляло собой одиночный импульс длительностью ~ 200 пс. Благодаря доплеровскому смещению частоты излучения в спектре рассеянного импульса были представлены частоты до 150 ГГц.
3. Разработаны высоковольтная и волоконно-оптическая системы синхронизации, с помощью которых в реальном времени с разрешением 10 пс проведены эксперименты по исследованию особенностей генерирования лазерного излучения в полупроводниковых материалах типа A₂B₆ (CdS, ZnSe, ZnCdS и др.) под действием сильных электрических полей и электронных пучков.
4. Экспериментально исследованы характеристики излучения полупроводниковых кристаллов в сильном электрическом поле (150 кВ, 250 пс). Обнаружено, что излучательные процессы протекают около поверхности полупроводника, а возникающее излучение имеет сложную временную структуру. Сначала возникает опережающий лидирующий пик длительностью ~20 пс, затем следует основной импульс излучения длительностью 60-100 пс.
5. Исследованы характеристики излучения различных полупроводниковых материалов (CdS – CdSe, CdS, ZnSe, ZnO, ZnSe – ZnS, ZnSSe, ZnCdS, CdS) под действием пикосекундных электронных пучков (длительность ~300 пс, плотность тока до 800 А/см²). Генерируемое излучение представляет собой импульс длительностью ~150 пс с оценочной мощностью ~10 кВт.
6. Полученные результаты позволили создать макет компактного и удобного в использовании генератора пикосекундных лазерных импульсов с двумя камерами для возбуждения образцов электрическим полем и электронным пучком, который позволяет генерировать импульсы излучения длительностью ~100 пс.
7. В исследованиях пучков убегających электронов предложенные комплексные методы позволили решить задачу определения верхней и нижней границ напряжений эмиссии электронов для заданных условий, т. е. определить такие значения напряжений на фронте ускоряющего импульса, при которых происходит формирование пучка («синхронизация» тока и напряжения).
8. Результаты исследований пикосекундных процессов в удлинённых атмосферных промежутках на стадии запаздывания импульсного пробоя позволили выяснить последовательность эмиссии потоков УЭ, которые с пикосекундной точностью «синхронизуют» пробой промежутка. Предложенные методы позволили управлять моментом эмиссии УЭ и стабилизировать его.

Основные публикации автора по теме диссертации.

1. Экспериментальное наблюдение эффекта свержизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки сильноточным релятивистским электронным сгустком субнаносекундной длительности / А. Г. Реутова, М. Р. Ульмаскулов, А. К. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин, В. И. Белоусов, Н. С. Гинзбург, Г. Г. Денисов, И. В. Зотова, Р. М. Розенталь, А. С. Сергеев // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 82, В. 5. – С. 295 – 299.
2. Экспериментальная установка для возбуждения полупроводников и диэлектриков пикосекундными импульсами электронного пучка и электрического поля / А. С. Насибов, К. В. Бережной, П. В. Шапкин, А. Г. Реутова, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин // ПТЭ. – 2009. – № 1. – С. 75 – 84.
3. Установка для регистрации пикосекундной динамики излучения полупроводниковых мишеней в газовом диоде / К. В. Бережной, М. Б. Бочкарев, А. С. Насибов, А. Г. Реутова, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин // ПТЭ. – 2010. – № 2. – С. 124 – 130.
4. Волоконно-оптическая система регистрации спектральных и динамических характеристик излучения газового диода / А. С. Насибов, К. В. Бережной, М. Б. Бочкарев, Г. Л. Даниелян, А. Г. Реутова, С. А. Шунайлов // Сборник докладов 20-ой Межд. конф. «Лазеры, измерения, информация» (Санкт-Петербург, Из-во СПГУ). – 2010. – Т. 1. – С. 5 – 13.
5. Investigations of laser radiation dynamics in semiconductors due to picosecond electron beams and electric field pulses / A. Reutova, S. Shunaylov, M. Yalandin, M. Bochkarev, K. Bereznoy, A. Nasibov // Journal of Korean Physical Society. – 2011. – Vol. 59, № 6. – P. 3513 – 3516.
6. Генератор пикосекундных лазерных импульсов / К. В. Бережной, А. С. Насибов, А. Г. Реутова, П. В. Шапкин, С. А. Шунайлов, М. И. Яландин // Краткие сообщения по физике. ФИАН. – 2011. – № 3. – С. 11 – 14.
7. Пат. 2393602 Российская Федерация, МПК H01S 5/042. Полупроводниковый электроразрядный лазер / Бережной К. В., Насибов А. С., Реутова А. Г., Шунайлов С. А., Яландин М. И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. – № 2008150670/28; заявл. 23.12.2008; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 7 с.: ил.
8. О моменте инжекции убегающих электронов на фронте ускоряющего импульса в атмосферном диоде с неоднородным полем: от неустойчивости к определённости / М. И. Яландин, А. Г. Реутова, К. А. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов, Г. А. Месяц // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36, В. 18. – С. 1 – 9.
9. Injection criteria and energy characteristics of runaway electron beam accelerated with a nonuniform field in atmospheric gap / S. Shunaylov, A. Reutova, V. Shpak, M. Yalandin, G. Mesyats // Journal of Korean Physical Society. – 2011. – Vol. 59, № 6. – P. 3517 – 3521.
10. On the observed energy of runaway electron beams in air / G. A. Mesyats, A. G. Reutova, K. A. Sharypov, V. G. Shpak, S. A. Shunaylov, M. I. Yalandin // Laser and Particle Beams. – 2011. – V. 29. – P. 425 – 435.

11. Пикосекундные пучки убегающих электронов в воздухе / Г. А. Месяц, М. И. Яландин, А. Г. Реутова, К. А. Шарыпов, В. Г. Шпак, С. А. Шунайлов // Физика плазмы. – 2012. – Т. 38, В. 1. – С. 34 – 51.
12. Laboratory demonstration of runaway electron breakdown of air / A. V. Gurevich, G. A. Mesyats, K. P. Zybin, A. G. Reutova, V. G. Shpak, S. A. Shunailov, M. I. Yalandin // Physics Letters A. – 2011. – Vol. 375. – P. 2845 – 2849.
13. Observation of the Avalanche of Runaway Electrons in Air in a Strong Electric Field / A. V. Gurevich, G. A. Mesyats, K. P. Zybin, M. I. Yalandin, A. G. Reutova, V. G. Shpak, S. A. Shunailov // Phys. Rev. Lett. – 2012. – Vol. 109, Iss. 8. – P. 085002-1-085002-4.
14. Picosecond Processes at the Delay Stage of Pulse Breakdown in Overvoltage Atmospheric Gap / A. G. Reutova, G. A. Mesyats, S. A. Shunailov, V. G. Shpak, M. I. Yalandin // Известия ВУЗов. Физика (High Current Electronics – Special Issue). – 2013. – Т. 55, Вып. 10/3. – С. 320 – 323.
15. Control and Stabilization of Runaway Electrons Emission at the Delay Stage of Pulsed Breakdown in Overvolted Atmospheric Gap / G. A. Mesyats, A. G. Reutova, S. A. Shunailov, V. G. Shpak, M. I. Yalandin // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 00, No. 00. – P. 00 – 00.