На правах рукописи

МОШКУНОВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ

РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте электрофизики и электроэнергетики РАН.

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, Хомич В. Ю.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, Борейшо А.С.

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Грехов И. В.

доктор технических наук, профессор, Романов А.А.

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится _____ 2011г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д.002.131.01 при Учреждении Российской академии наук Институте электрофизики и электроэнергетики РАН по адресу: 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д.18, ИЭЭ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЭЭ РАН.

Автореферат разослан ”____”_____ 2011 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета кандидат технических наук А.А. Киселев

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время генераторы высоковольтных импульсов наносекундной длительности широко используются в электрофизике, в газоразрядной, лазерной и ускорительной технике, при создании электрофизических и плазмохимических установок, а также в других областях науки и техники [1,2].

Важную область применения генераторов наносекундных импульсов составляют системы питания газоразрядных лазеров. Лазеры и технологии на их основе уже стали неотъемлемой частью современного промышленно развитого мира и находят широкое применение в машиностроении, медицине, точном приборостроении, военной технике, технологиях передачи информации и т.д. Среди различных типов лазеров, лазеры на парах меди и эксимерные ArF - лазеры занимают особое место, поскольку обладают набором уникальных характеристик.

Лазер на парах меди (ЛПМ) является одним из наиболее эффективных источников когерентного излучения в видимом диапазоне спектра среди всех известных на сегодняшний день газовых лазеров [3-5]. ЛПМ имеет такое сочетание характеристик, которое делает его незаменимым в ряде областей науки, техники и медицины.

Эксимерный ArF лазер является наиболее мощным источником вакуумного ультрафиолетового излучения. Излучение лазера поглощается практически во всех материалах и может быть сфокусировано в пятно диаметром порядка длины волны, что позволяет получать высокую интенсивность и локальность воздействия лазерного луча на вещество, что особенно важно для его применений в области микрообработки материалов и фотолитографии. ArF лазер является незаменимым инструментом в офтальмологии и при нанесении брэгговских решеток в световодах.

Актуальной проблемой также является совершенствование систем импульсной накачки лазеров, являющееся необходимым условием решения

целого ряда задач: увеличения выходной мощности, достижения высокой надежности, снижение габаритов и массы, создание устройств доступных для применения в промышленности, медицине и специальной технике.

Особый класс составляют генераторы импульсов с относительно небольшой пиковой мощностью (10—30 МВт), но работающие с достаточно высокими частотами повторения (10 кГц и более). Такие устройства необходимы для питания газовых лазеров, электро-разрядных систем очистки воздуха и воды, и других электрофизических установок.

Выбор коммутатора для работы с высокой частотой повторения и большой скоростью нарастания тока оказывается ограниченным. Из традиционных коммутаторов в данной области наиболее широко используются тиратроны и модуляторные лампы [3-6]. Использование газоразрядных и вакуумных ключей позволяет коммутировать напряжения до ~100 кВ и токи до ~10 кА при скоростях нарастания тока 10÷100 кА/мкс, однако такие коммутаторы подвержены деградации рабочих характеристик и имеют недостаточную долговечность и надежность.

В случае промышленных применений переход к твердотельной электронике не имеет альтернативы, так как лишь в этом случае достигаются необходимые сроки службы, стабильность характеристик, мгновенная готовность к работе и технологичность создаваемого оборудования.

Таким образом, одной из важнейших и актуальных научно-технических проблем в этих областях является разработка и создание долговечных, надежных и эффективных генераторов с использованием современной твердотельной элементной базы. Ключевая задача по данному направлению исследований - разработка высоковольтного твердотельного коммутатора способного заменить тиратроны и модуляторные лампы в генераторах мощных наносекундных импульсов с высокой частотой следования.

В последние десятилетия появились и быстро развивались твердотельные ключи новых типов такие как дрейфовые диоды с резким восстановлением , SOS-диоды, динистор с глубокими уровнями и реверсивно

включаемого динистора, позволившие осуществить прорыв твердотельной импульсной техники в область гигаваттых мощностей и пикосекундных длительностей [2,6]. Однако генераторы импульсов на основе данных ключей являются достаточно сложными устройствами, практическое применение которых в мегаватной области мощностей не всегда оправдано.

В последнее время произошел значительный прогресс и в области полупроводниковых коммутаторов для преобразовательной техники. Одним из наиболее перспективных приборов для рассматриваемых областей применения представляется биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ или IGBT в англоязычной литературе), который по скорости нарастания тока уже не уступает многим тиратронам. Однако, поскольку БТИЗ еще остается относительно низковольтным прибором, то для создания мощных высоковольтных генераторов на его основе требуется решения проблемы эффективной и надежной работы большого числа БТИЗ с последовательным и параллельным соединением.

Цель работы

Основной целью настоящей диссертационной работы является разработка, создание и исследование генераторов высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором, разработка принципов построения и создание высокоэффективных и надежных, полностью твердотельных генераторов высоковольтных импульсов для питания ряда электрофизических систем, таких, как импульсно-периодические газоразрядные лазеры, установки для создания электрогидродинамических потоков на основе барьерного разряда, системы очистки водной и воздушной сред, электрофизические установки для изучения взаимодействия электронных пучков и электромагнитного излучения сверхвысокой интенсивности с плазмой.

Целью диссертации является также исследование процессов в данных электрофизических системах и определение оптимальных параметров элементов и режимов работы предложенных импульсных систем питания.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в приоритетном характере основных результатов данной диссертации, перечисленных ниже в разделе III, позволивших расширить знания о проблеме создания высокоэффективных твердотельных генераторов импульсного питания электрофизических устройств на основе высоковольтного составного транзисторного коммутатора. Основные выводы диссертации получены впервые. Предложенный автором диссертации новый подход к созданию генераторов высоковольтных наносекундных импульсов на основе БТИЗ привел к появлению целого класса электрофизических приборов. Разработанные и созданные автором генераторы импульсов для питания электрофизических установок не уступают мировым аналогам, а по ряду технических характеристик превосходят их.

Научная и практическая значимость

Разработанный, созданный и исследованный автором работы составной высоковольтный полупроводниковый коммутатор на основе БТИЗ позволил в генераторах высоковольтных наносекундных импульсов с высокой частотой повторения заменить тиратроны твердотельными элементами. Основными преимуществами предложенного коммутатора по сравнению с тиратронами являются: высокая надежность и долговечность, управляемое включение и выключение, стабильность характеристик, низкие потери и сравнительно малые габариты и вес.

На основе разработанного составного твердотельного коммутатора создан генератор высоковольтных наносекундных импульсов с высокой частотой повторения. Такой генератор не содержит импульсного повышающего трансформатора, который снижает надежность работы, при этом значительно повышает массогабаритные характеристики.

Результаты экспериментов показали высокую надежность и эффективность накачки лазерных систем, которые по всем электрическим и оптическим параметрам превзошли системы питания на основе тиратронов.

Одним из основных практических преимуществ предложенного коммутатора является возможность увеличения рабочего напряжения и коммутируемого тока путем масштабирования, благодаря чему можно создавать системы с более высокой импульсной и средней мощностью.

Новый составной высоковольтный коммутатор позволил заменить газоразрядные и вакуумные коммутаторы в генераторах высоковольтных наносекундных импульсов с высокой частотой повторения, работа которых сопровождается постепенной деградацией характеристик (модуляторные лампы) и выходом из строя в силу невысокой надежности (тиратроны).

Разработаны научные основы создания твердотельных систем импульсного возбуждения для ряда широко применяемых лазеров. Новый подход был применен при создании генераторов системы накачки лазеров на парах меди и эксимерных ArF-лазеров, по ряду параметров превосходящих мировые аналоги. Разработана и реализована технология удлинения импульсов излучения эксимерных лазеров, открывающая перспективу увеличения энергии импульса и уменьшения расходимости пучка.

Созданные автором генераторы импульсов применены в ряде электрофизических установок, имеющих большое научное и практическое значение, что позволило существенно улучшить их характеристики.

Полученные автором результаты исследования и созданные при его личном участии и руководстве разработки были использованы, как в отечественных организациях: Учреждений Российской академии наук: ИЭЭ РАН, г. Санкт-Петербург, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, ОИВТ РАН, ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, ИАПУ ДВО РАН г. Владивосток, ЦФП ИОФ РАН г. Троицк, моск. обл.; НПО Алмаз, г.Москва, а также РНЦ «Курчатовский институт», НПО «Астрофизика» г.Москва, НПО «Полюс» г.Москва, ООО «АлексЛаб» г.Москва, так и за рубежом: в Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), г. Тэджон, Республика Корея, в Центре лазерной обработки VTT, Technical Research Center of Finland, г. Лаппеенранта, Финляндия.

Основные положения, выносимые на защиту :

Новый подход к созданию генераторов высоковольтн*ых* импульсов наносекундного диапазона, заключающийся в использовании в качестве основного высоковольтного ключа твердотельного коммутатора, состоящего из биполярных транзисторов с изолированным затвором, соединенных последовательно–параллельно, и работающего в режиме неполного разряда накопительного конденсатора с удвоением напряжения и последующим сжатием импульса с помощью магнитного компрессора.

Разработанные схемы и конструкции ряда составных высоковольтных твердотельных коммутаторов (рабочее напряжение – 4÷35 кВ, ток в импульсе – 10÷200 А, времена нарастания и спада тока – 4÷50 нс) на основе последовательно-параллельно включенных биполярных транзисторов с изолированным затвором и элементов их управления.

Высоковольтный твердотельный коммутатор на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором обладает свойством линейной масштабируемости характеристик методом параллельно-последовательного соединения транзисторов.

Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе твердотельного коммутатора, состоящего из последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором, может эффективно использоваться для создания систем накачки лазеров на парах меди и представляет собой реальную альтернативу существующим системам, а по ряду параметров их превосходит. Получены выходные параметры лазера: средняя мощность излучения – 12 Вт, длительность импульса – 17÷20 нс при частоте повторения – 15 кГц, коэффициент полезного действия – 0,7 %.

Оптимальные значения параметров режимов работы и величин элементов схемы генератора для предложенной полностью твердотельной системы накачки лазера на парах меди.

Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе высоковольтного твердотельного коммутатора состоящего из последова-

тельно-параллельно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором может эффективно использоваться для накачки эксимерного ArF лазера. Получены выходные параметры лазера: длительность импульса – до 18 нс, энергия в импульсе – до 15 мДж, средняя мощность на длине волны 193 нм – до 10 Вт при частоте повторения – 1 кГц, размер пучка – 5×12 мм^2, расходимость пучка – 2×4 мрад.

Система накачки эксимерного ArF лазера на основе высоковольтного твердотельного коммутатора и нелинейной формирующей линии позволяет эффективно управлять длительностью импульса накачки при сохранении малого времени нарастания импульса накачки, обеспечивая формирование более однородных самостоятельных разрядов с увеличенной длительностью и снижение расходимости пучка.

Метод регистрации и спектрометрии легких заряженных частиц на основе их транспортировки от источника к детектору в магнитном поле линейного тока, позволяющий достигать величины светосилы, близкие к предельным значениям. Результаты теоретического и экспериментального обоснования данного метода.

Генераторы на основе составного твердотельного коммутатора могут эффективно использоваться в электрофизических установках: для организации электрогидродинамических потоков на основе барьерного разряда, для очистки воздуха и воды, для исследования взаимодействия электронных пучков и электромагнитного излучения сверхвысокой интенсивности с плазмой и для систем управления электрооптическими приборами.

Личный вклад автора диссертации

Все результаты диссертации получены лично автором или при его непосредственном участии, либо под его научным руководством.

Личный вклад автора состоит в обосновании идеи работы и ее реализации путем постановки цели и задач исследования, руководства и непосредственного участия в выполнении теоретических, экспериментальных исследований, а так же обобщения результатов

исследований и разработки рекомендаций по их использованию. Автор непосредственно участвовал в разработке методик измерения, построении математических моделей, анализе и интерпретации полученных результатов.

При непосредственном участии и под руководством автора работы были разработаны, созданы и исследованы целый ряд уникальных электрофизических установок.

Апробация работы и научные публикации

По материалам диссертации автором опубликованы 35 научных работ, включая 16 статей и 2 авторских свидетельства на изобретения.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Учреждений Российской академии наук: ИЭЭ РАН, г. Санкт Петербург, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, г. Москва; НПО Алмаз, г. Москва, на семинаре по итогам проектов по программе Президиума РАН «Поддержка инноваций и разработок» Москва 2009, а также докладывались на следующих международных конференциях и симпозиумах: «Лазерные технологии XXI века» (2007, Москва, РФ), "Лазеры на парах металлов" (2008 и 2010, Лоо, РФ), 17-я международная конференция по лазерным технологиям Advanced Laser Technologies ALT'09 (2009, Анталия, Турция), International Simposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering, (1986 Quebec, Canada), 37-е совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомных ядер" (1987, Юрмала), "International Conference on Computer, Electrical, and Systems Sciences, and Engineering" (ICCESSE 2011, Бангкок, Таиланд), на 8-й конференции Power Electronics – (ECCE Asia, 2011, Jeju, Korea), 8-й международной конференции Nanosciences & Nano-technologies (NN11, 2011, Салоники, Греция).

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Ее полный объем – 246 страниц машинописного текста, включая 93 рисунка, 6 таблиц и список литературы, насчитывающий 264 наименования.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлен объект исследования – генераторы высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором для систем питания электрофизических установок. Обоснована актуальность темы диссертации, указывается степень разработанности научной проблемы, сформулирована цель работы и ставятся задачи исследований. Отмечена научная новизна работы и ее научная и практическая значимость, представлены защищаемые положения диссертационной работы, личный вклад автора и ее апробация. Далее во введении приводится краткое содержание работы по главам и основные научные результаты диссертации.

Первая глава диссертации носит обзорный характер и посвящена современному состоянию в области создания генераторов высоковольтных наносекундных импульсов для систем возбуждения газоразрядных лазеров и других электрофизических установок.

Рассмотрены существующие системы накачки лазеров на парах меди и эксимерного ArF лазера, и их основные преимущества и недостатки. Показаны перспективы применения современной твердотельной элементной базы и новых схемных подходов для создания долговечных, надежных и эффективных систем накачки лазеров. Рассмотрены генераторы высоковольтных наносекундных импульсов на основе различных типов коммутирующих элементов, различные схемные решения систем питания саморазогревных лазеров на парах меди и проблема генерации высоковольтных наносекундных импульсов в системах питания эксимерного ArF лазера.

К недостаткам традиционно применяемых в системах накачки указанных типов лазеров коммутирующих элементов (ламп и тиратронов) можно отнести деградацию параметров этих приборов в течение срока службы и необходимость частого их обслуживания или замены и, кроме того, лампы и тиратроны требуют достаточно мощных и дорогих систем управления и вспомогательных источников питания.

Прогресс в области создания новых типов полупроводниковых коммутирующих элементов привел к появлению SOS-диодов, реверсивно включаемых динисторов (РВД), дрейфовых диодов с резким восстановлением (ДДРВ), мощных МОП–транзисторов (металл-окисел-полупроводник) и БТИЗ способных коммутировать большие энергии.

Выгодным отличием БТИЗ является практически неограниченный ресурс работы при стабильности рабочих параметров в течение всего срока службы, способность работать при более высокой частоте повторения импульсов, полная управляемость прибора (как включение, так и выключение), простота схем управления и низкие энергозатраты, а также малые габариты и вес отдельного прибора.

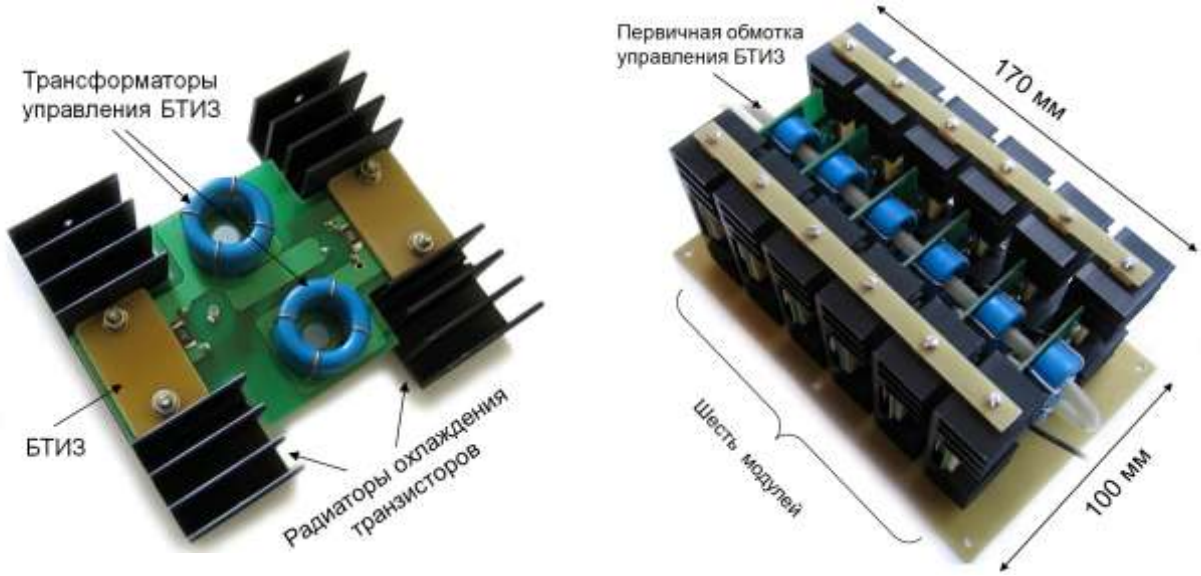
Высоковольтные ключи на основе БТИЗ могут стать реальной и экономически выгодной альтернативой традиционным коммутирующим элементам при создании мощных импульсных модуляторов, применяемых в системах питания газоразрядных лазеров.

Во второй главе представлен предложенный автором диссертации новый подход к созданию генераторов высоковольтных импульсов наносекундного диапазона, заключающийся в использовании в качестве основного высоковольтного ключа твердотельного коммутатора, состоящего из биполярных транзисторов с изолированным затвором, соединенных последовательно–параллельно, и работающего в режиме неполного разряда накопительного конденсатора с удвоением напряжения и последующим сжатием импульса с помощью магнитного компрессора. Сформулированы основные принципы построения таких генераторов.

Проанализированы основные особенности работы коммутатора, состоящего из достаточно большего числа последовательно соединенных БТИЗ. Показаны преимущества схемы с раздельными управляющими трансформаторами и представлена методика расчета ее основных элементов. Рассмотрены основные дестабилизирующие факторы для работы составного коммутатора — разброс температур кристаллов и других параметров БТИЗ.

Найдена связь между областью безопасной работы составного ключа и таковой для отдельного БТИЗ. Показано, что оптимально использовать БТИЗ малой и средней мощности, разработанных по NPT- технологии, ввиду их минимальных задержек срабатывания, большей устойчивости к перегрузкам и возможностью работы при параллельном соединении.

На рисунке 1 представлен разработанный и созданный автором модуль ключа с рабочим напряжением 2 кВ (а) и высоковольтный твердотельный коммутатор с рабочим напряжением 12 кВ.



а б

Рис.1. 2-кВ модуль ключа (а) и 12-кВ ключ в сборе.

Скорость нарастания тока через отдельный БТИЗ коммутатора ограничена значением $\approx 2\times10^9$ А/с. Повышение скорости нарастания тока может быть достигнуто как параллельным соединением транзисторов, так и применением специальных схемотехнических решений, позволяющих сократить времена нарастания и длительность импульса, полученного на выходе транзисторного коммутатора.

Увеличение количества транзисторов в ключе не всегда бывает экономически обоснованным, поэтому для уменьшения времен нарастания и длительности импульса, полученного на выходе коммутатора, была предложена схема генератора высоковольтных наносекундных импульсов (рис.2) на основе коммутатора, состоящего из параллельно-последовательно

соединенных БТИЗ, работающего совместно с двухступенчатой системой магнитного сжатия импульсов.

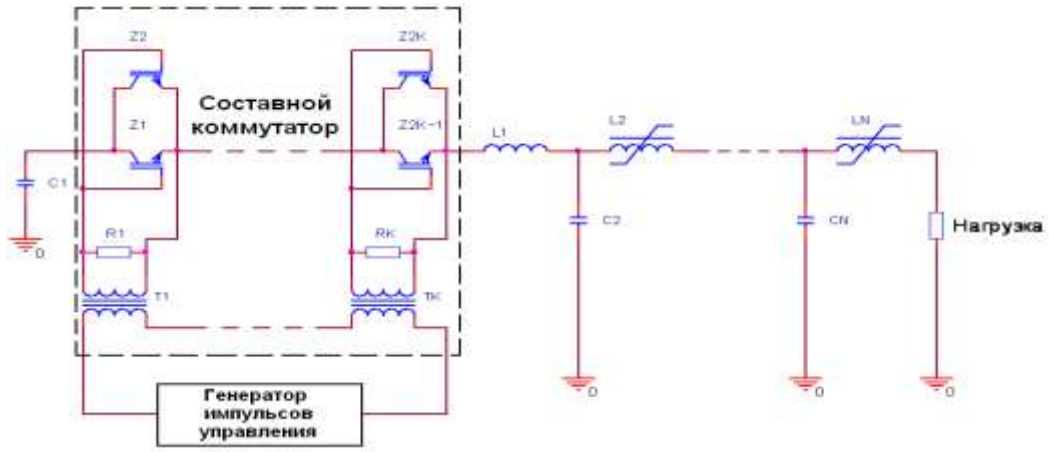


Рис.2. Схема генератора высоковольтных импульсов.

Предлагаемая схема генератора имеет следующие преимущества: возможность режима с неполным разрядом накопительног конденсатора, наличие гальванической развязки силовых цепей от низковольтных цепей управления, полностью управляемое включение и выключение, высокая частота повторения импульсов, устойчивость к короткому замыканию.

Произведен расчет параметров дросселей в звеньях магнитного компрессора импульсов. Соотношение для коэффициента сжатия имеет вид:

$$K = \frac{2\Delta B}{\pi \mu_S \mu_0 H_m^2},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ Гн \cdot м^{-1}$, μ_s – магнитная проницаемость сердечника в насыщенном состоянии, ΔB – максимальное изменение магнитной индукции сердечника, H_m – напряженность магнитного поля. Найден оптимальный объем материала сердечников звеньев магнитного компрессора:

$$V_e \approx A_e l = \frac{C V_m^2}{2 \mu_S \mu_0 H_m^2},$$

где A_e – площадь поперечного сечения сердечника, l – средняя длина магнитной линии сердечника, C – емкость конденсаторов в звене сжатия, V_m – амплитудное напряжение на конденсаторах звеньев.

Представлена методика расчета оптимальной геометрии и количества сердечников из числа серийно выпускаемых изделий. Марки материалов сердечников (Epcos N87 и 2000НМ) были выбраны экспериментально по наилучшему соотношению коэффициента сжатия и потерь в материале. Представлены расчеты числа витков и сечения провода дросселей, предложена конструкция магнитного компрессора, отвечающая требованиям к электрической прочности и отводу тепла, обусловленного потерями в материале сердечников.

Третья глава диссертационной работы посвящена созданию и исследованию лазера на парах меди с системой накачки на основе высоковольтного твердотельного коммутатора.

В данной главе представлена разработанная, созданная и исследованная автором полностью твердотельная система накачки лазера на парах меди на основе составного высоковольтного коммутатора, состоящего из последовательно соединенных БТИЗ.

Представлены результаты применения предложенного во второй главе схемного подхода для создания генератора импульсов накачки лазера на парах меди и разработки конструкции системы накачки лазера на парах меди, а также результаты ее экспериментального исследования и оптимизации параметров генератора (рис. 3).

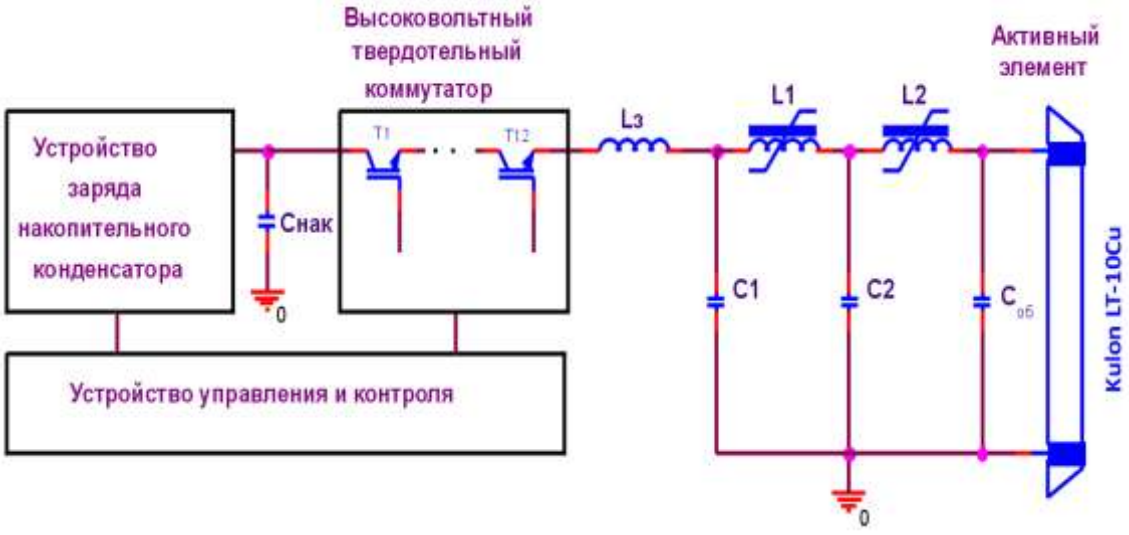
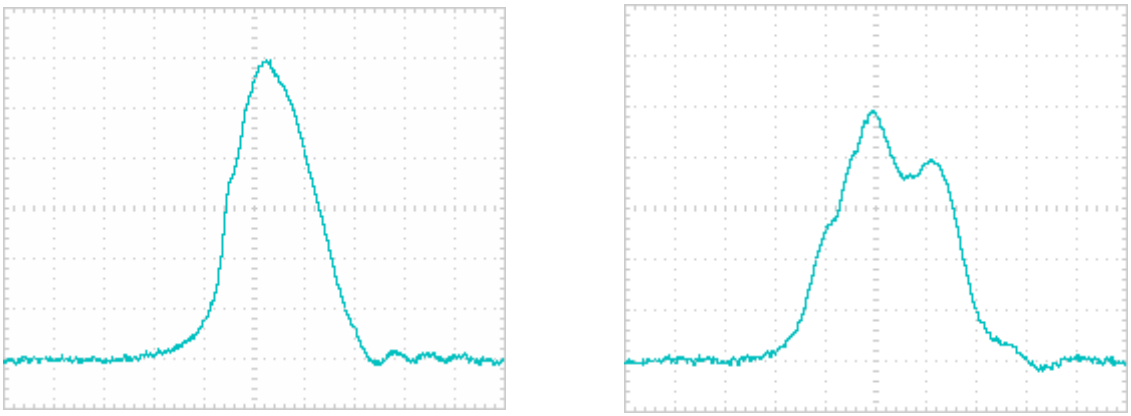


Рис.3. Структурная схема лазера на парах меди.

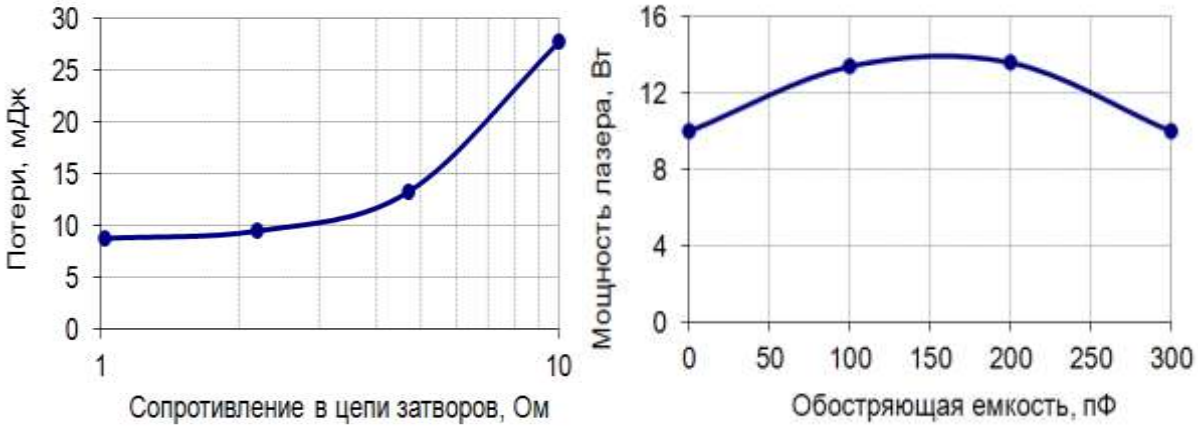
На 0 приведена осциллограмма тока, полученная при работе генератора на резистивную нагрузку 30 Ом. Время нарастания составило 25 нс, а длительность импульса по полувысоте – 50 нс. На рис. 4б приведена осциллограмма тока через активный лазерный элемент в режиме генерации излучения. Как можно видеть, время нарастания составляет 35 нс, при общей длительности импульса по полувысоте ≈70 нс.



а б

Рис.4. Осциллограммы тока: а) через Kulon LT-10Cu. б) через нагрузку 30 Ом. Масштаб по Y – 40А/дел, по X – 25 нс/дел

Проведены экспериментальные исследования и оптимизация параметров системы накачки лазера на парах меди (рис. 5, 6). В главе приводятся выбранные значения основных элементов схемы и параметры оптимальных режимов работы.



а б

Рис.5. Зависимости энергии потерь в ключе от сопротивления в затворах БТИЗ (а) и мощности лазера от обостряющей емкости (б).

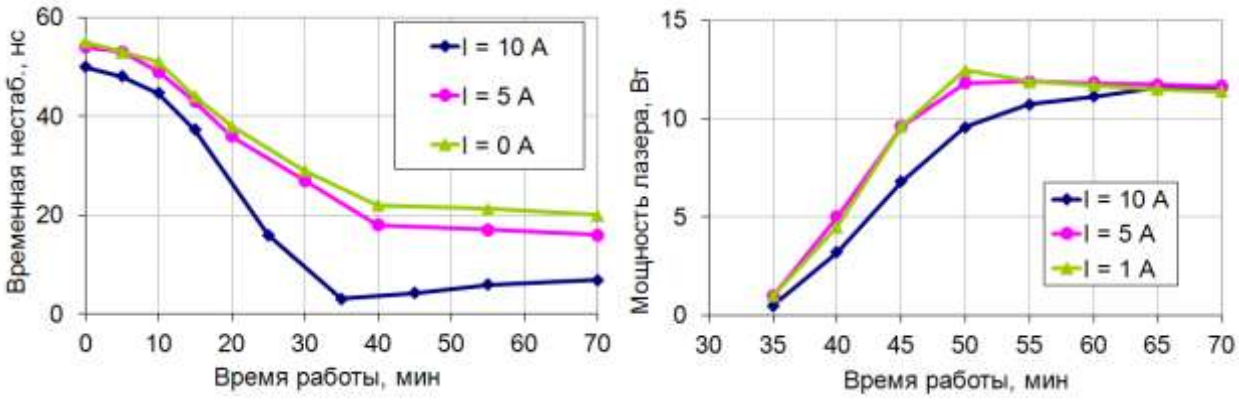


Рис.6. Временная нестабильность следования импульсов (а) и средняя мощность излучения (б) в зависимости от тока перемагничивания.

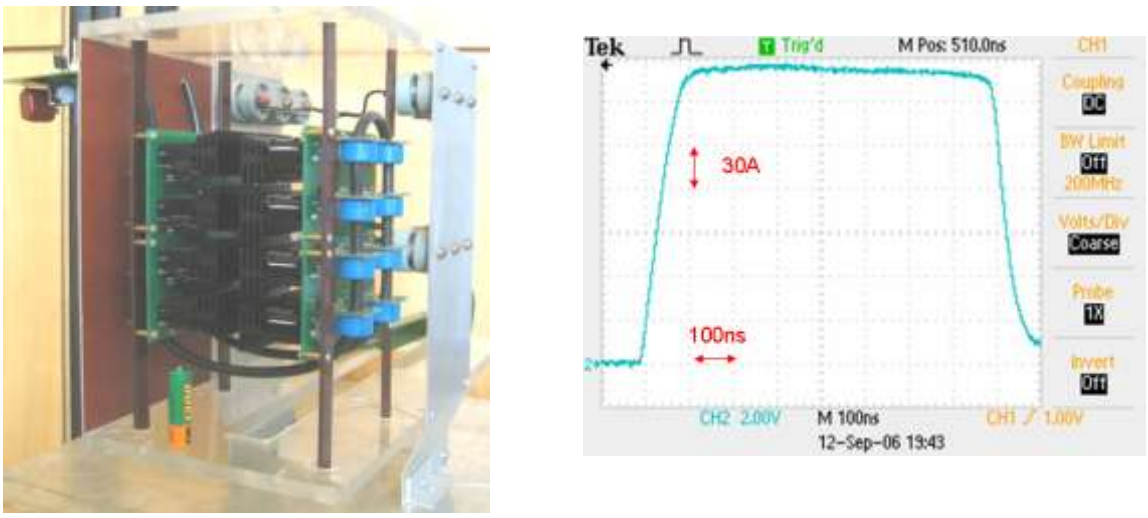
В результате работы был разработан и создан компактный лазер на парах меди на основе активного элемента Kulon LT-10Cu и высоковольтного твердотельного генератора, который имел следующие основные параметры: средняя мощность излучения с плоским резонатором—12 Вт при энергии в импульсе — 0.8 мДж и его длительности — 17 нс и частоте повторения импульсов—15 кГц, а соотношение мощностей излучения на линиях 510.6 и 578.2 нм составило 3/2. Расходимость излучения с плоским резонатором составила 4.5 мрад, а с неустойчивым резонатором— 0.3 мрад при диаметре пучка 14 мм. Время выхода лазера на стационарный режим составило 50 мин. Коэффициент полезного действия ЛПМ был равен ≈0,7%.

Вышеприведенные параметры лазера, а также повышенный ресурс и надежность его работы показывают, что применение предложенной автором твердотельной системы накачки позволил разработать конкурентоспособную модель ЛПМ для лазерного рынка.

В четвертой главе диссертации представлены результаты разработки, создания и исследования генератора импульсов на основе высоковольтного твердотельного коммутатора для накачки ArF лазера.

Для расчета параметров работы генератора была разработана его принципиальная схема и с помощью программы PSPICE создана его компьютерная модель. В результате компьютерного моделирования была получена оптимальная схема генератора и рассчитаны ее компоненты.

Для реализации системы накачки эксимерного ArF лазера был разработан высоковольтный твердотельный коммутатор, состоящий из 32-х БТИЗ, соединенных параллельно-последовательно. Коммутатор имел рабочее напряжение 16 кВ и допустимый ток до 200 А (рис.7а). На рис.7б представлена осциллограмма тока через коммутатор (нагрузка – 75 Ом, входное напряжение - 16 кВ, амплитуда напряжения на нагрузке – 15,3 кВ).



а б

Рис.7. Высоковольтный твердотельный коммутатор (а) и осциллограмма тока через коммутатор (б).

На основе предложенного автором высоковольтного твердотельного коммутатора была разработана и исследована система возбуждения эксимерного ArF лазера (рис.8).

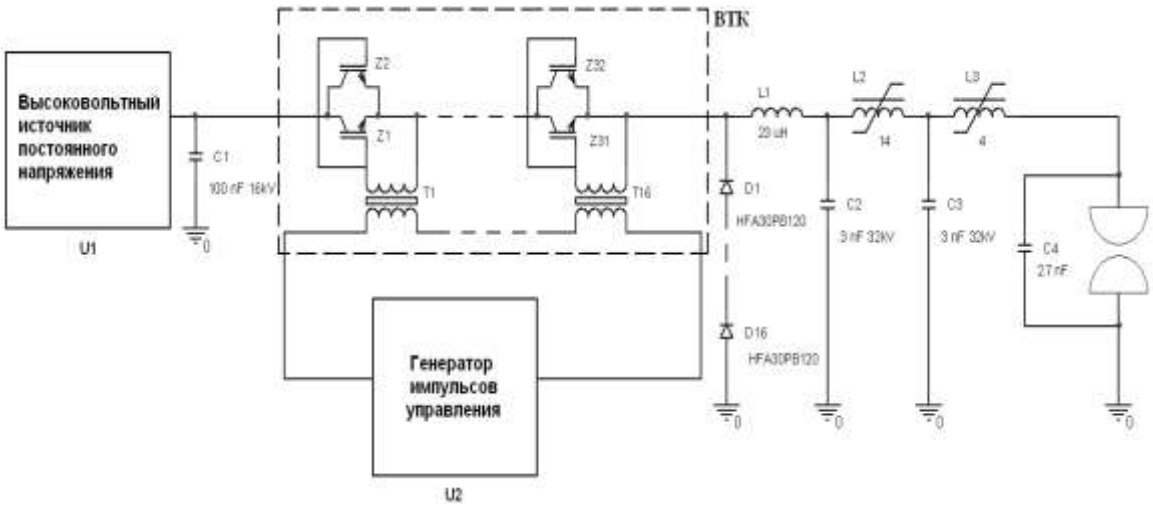
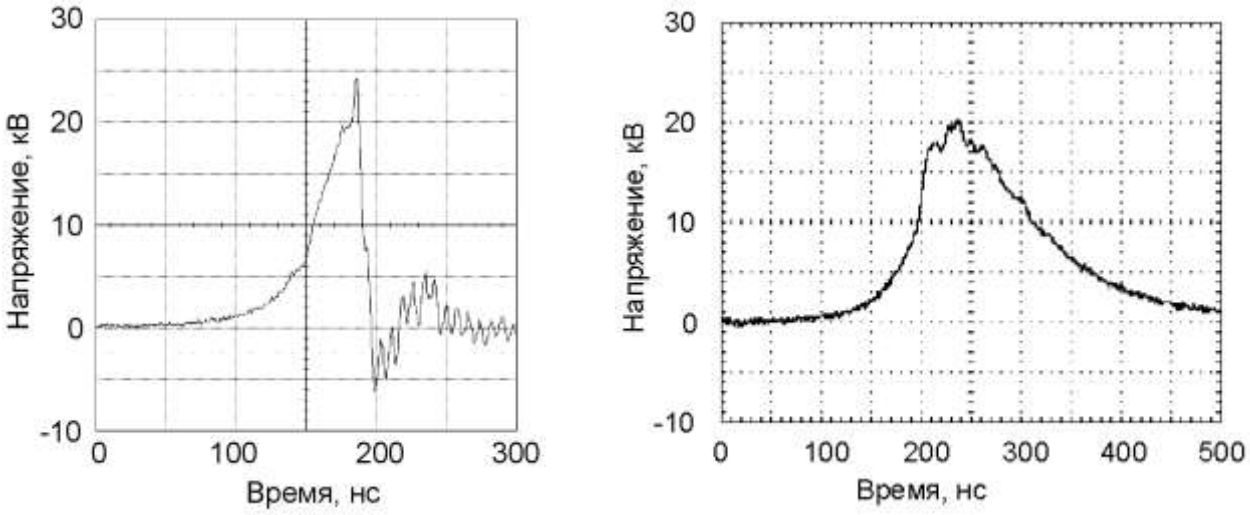


Рис.8. Схема генератора накачки эксимерного ArF лазера

Генератор состоит из высоковольтного твердотельного коммутатора и системы магнитного сжатия импульсов, обеспечивающей требуемую скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке.

Система накачки имеет следующие основные параметры: амплитудное напряжение обостряющего конденсатора С4 – 20÷27 кВ, пиковый ток заряда С4 – 1,2÷1,5 кА, длительность импульса тока по полувысоте – 70 нс, время нарастания выходного напряжения (по уровню 0,1/0,9) – 60 нс, частота повторения импульсов – 2 кГц, средняя мощность – 2 кВт. Максимальная частота повторения выходных импульсов наносекундного генератора ограничивается временем восстановления напряжения на накопительном конденсаторе С1, то есть, мощностью высоковольтного источника, и эффективностью отвода тепла от элементов ключа и магнитного компрессора.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эксимерного ArF лазера с твердотельной системой накачки (рис. 9). Достигнуты следующие параметры лазера: средняя мощность излучения на длине волны 193 нм – 10 Вт при энергии в импульсе – 15 мДж и его длительности – 18 нс и частоте повторения импульсов – 1 кГц. Размер пучка составил 5×12 мм^2, а расходимость излучения при использовании плоского резонатора – 2×4 мрад.



а б

Рис.9. Напряжение на разрядном промежутке эксимерного лазера (а) и напряжение на выходе генератора (нагрузка 30 Ом) (б).

В результате ресурсных исследований высоковольтного генератора при накачке эксимерного ArF лазера на активную нагрузку 30 Ом при частоте следования импульсов до 2 кГц было установлено, что твердотельный коммутатор на БТИЗ работает надежно, сохраняя стабильность выходных характеристик на протяжении всего времени испытаний (более 1000 часов).

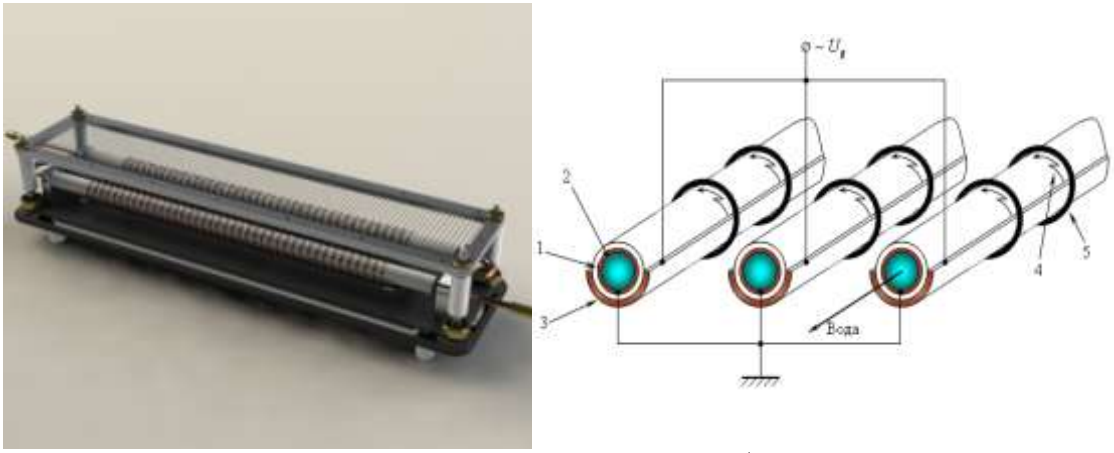
В ходе исследований был получен коэффициент полезного действия генератора не менее 80%. По этому параметру, а также по значениям напряжений и токов накачки генератор не уступает системам на основе тиратронов, но значительно превосходит их по надежности и долговечности.

В работе также показано, что генератор импульсов накачки эксимерного ArF лазера можно эффективно применять для получения режима с удлиненным импульсом накачки. Такой режим необходим для растяжки импульса генерации, что позволяет улучшить пространственные характеристики ультрафиолетового лазерного пучка и является достаточно важным для целого ряда применений эксимерных лазеров.

В пятой главе диссертации описан метод и аппаратура для эффективного возбуждения мощных электрогидродинамическим (ЭГД) потоков. Для формирования скоростных газовых сред все чаще применяются электрические системы прокачки, работа которых основана на ЭГД-эффекте, которого также называют «электрическим ветром».

Для формирования ЭГД-потоков было предложено использовать мощный источник ионов на основе высокочастотного барьерного разряда, распределенного по поверхности диэлектрика. Для системы питания была разработана серия полностью твердотельных высоковольтных генераторов.

Конструкция плазменного эмиттера ионов (рис. 10) представляет собой набор параллельных трубок из керамики Al_2O_3. Внутрь керамических трубок вставлены медные трубки - 2, служившие внутренними электродами. Внешними электродами являлись медные желоба - 3 длиной 20 см. На желобах намотана медная проволока -4 диаметром 0,5 мм. Выделявшееся при работе тепло, отводилось водой, протекавшей через медные трубки.



а б

Рис.10. Установка для получения электрического ветра (а) и ячейка барьерного разряда (б). 1, 2 – трубки из Al_2O_3 и меди; 3 – желоба.

Металлическая сетка над плазменным эмиттером, служит коллектором ионов. На нее подавалось постоянное напряжение смещения U_0 = 0÷21 кВ.

На рис.11 показана схема питания плазменного эмиттера на основе генератора, в котором применены два 16-кВ высоковольтных твердотельных ключа (ВТК1 и 2 на рис.11), образующих полумост. Генератор позволял менять частоту и длительность импульсов в широких пределах для поддержания стационарного процесса горения барьерного разряда.

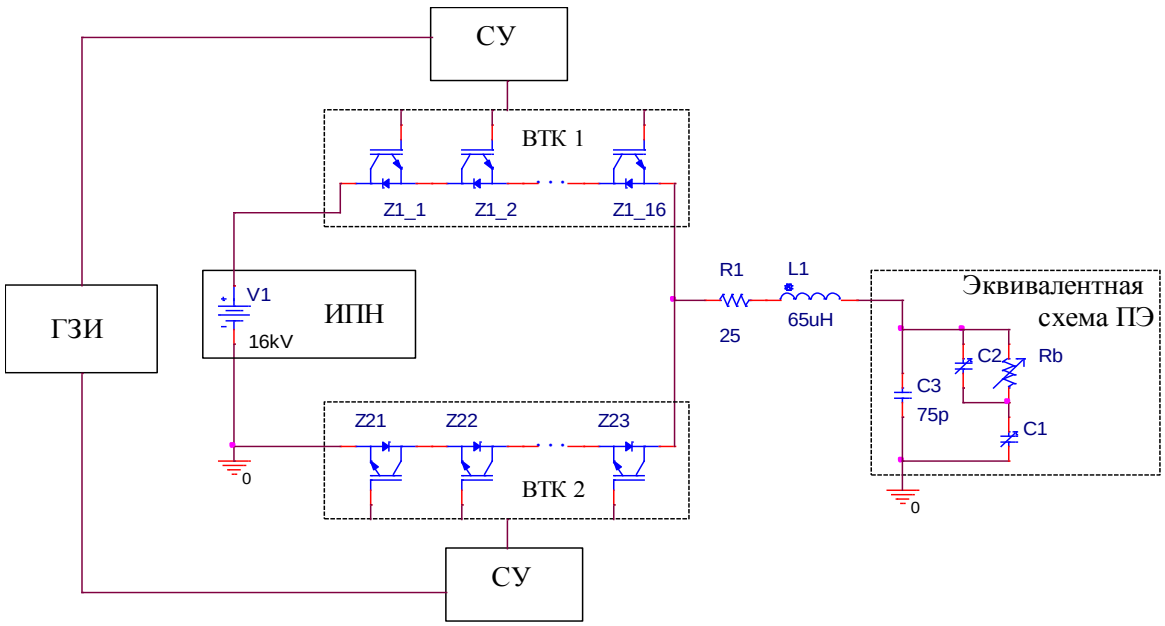


Рис.11. Схема высокочастотного генератора импульсов

Скорость ЭГД потока в атмосферном воздухе измерялась термоанемометром АТТ-1004.

На рисунке 12 (а) показаны экспериментальные зависимости среднего тока ионного пучка I_0 от напряжения на коллекторе U_0 при неизменном расстоянии между эмиттером и коллектором d = 18 мм и разных значениях амплитуды U_f и частоты f питания плазменного эмиттера. Ток I_0 увеличивается $\sim U_0^2$. Измеренные зависимости скорости ЭГД потока V от напряжения U_0, приведены на рис.12б. Величина V также растет с повышением U_0, U_f и f, но в отличие от ионного тока скорость потока пропорциональна U_0.

При работе плазменного эмиттера ионов с полностью твердотельной схемой питания была получена рекордная для аналогичных систем величина газового потока более 15 л/с.

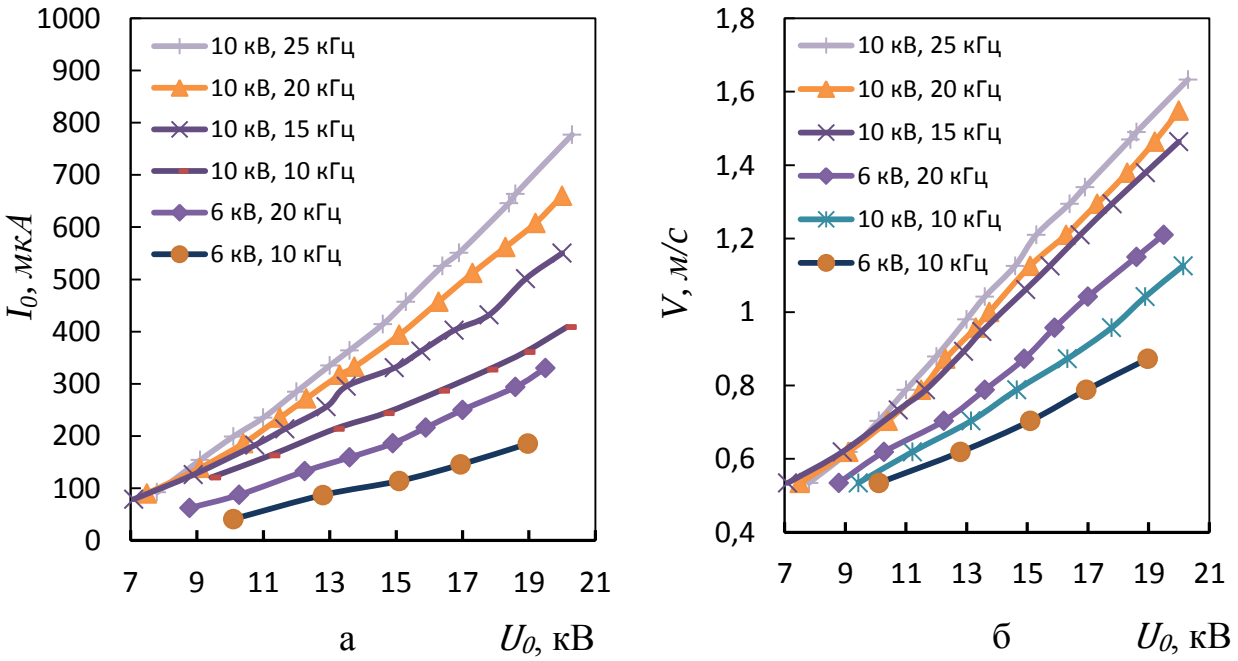


Рис.12. Зависимости тока ионов (а) и скорости воздушного потока над трубкой (б) от напряжения на сетке при различных значениях U_f.

Результаты исследований могут быть использованы в технологиях газоочистки, сепарации, при нанесении покрытий и модификации свойств поверхностей, в космосе для сдува пузырей с фильтрующих сеток топливных каналов и при создании безлопаточных электро-гидронасосов, в аэронавтике для управления воздушным потоком у поверхности крыла.

В шестой главе диссертации рассмотрен ряд важных применений высоковольтных БТИЗ-коммутаторов и генераторов на их основе. Приводится описание установок и режимов работы генераторов. Также в главе представлена модификация предлагаемого в работе коммутатора, способного длительный промежуток времени находится в открытом состоянии, что отвечает требованиям, предъявляемым к системам питания ряда научных и технологических электрофизических установок.

В первом параграфе описан генератор высоковольтных наносекундных импульсов для экспериментальной установки «ЭХО», предназначенной для исследования процессов физико-химической модификации гетерогенной органической среды, состоящей, в том числе, из природных углеводородов или продуктов их первичного передела.

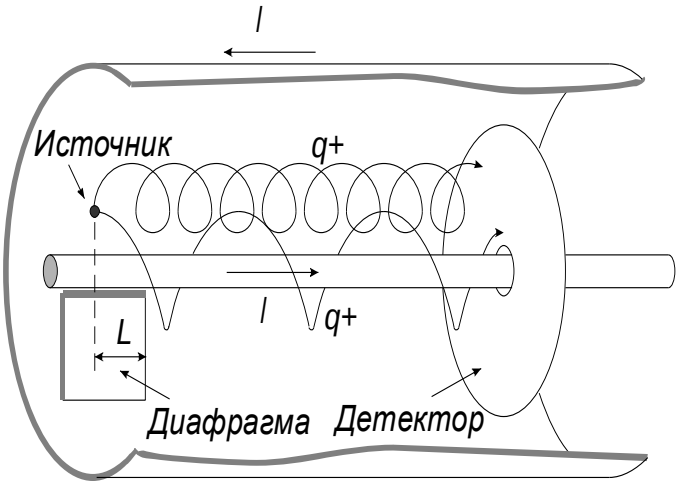
Частотно-импульсный источник питания разряда установки «ЭХО» представляет собой генератор электрических импульсов с мощностью 10 МВт (20 кВ, 750 А, 150 нс). В данной установке генератор работал синхронно с импульсно-периодическим электронным пучком (3—4 МэВ, 0,5 МВт, 3—5 мкс, частота повторения 300 Гц). Пучок вводился через титановую фольгу в реакторную камеру с гетерогенной средой. Разработанный составной высоковольтный ключ, используемый в генераторе, позволил существенно повысить надежность, эффективность и долговечность системы в целом.

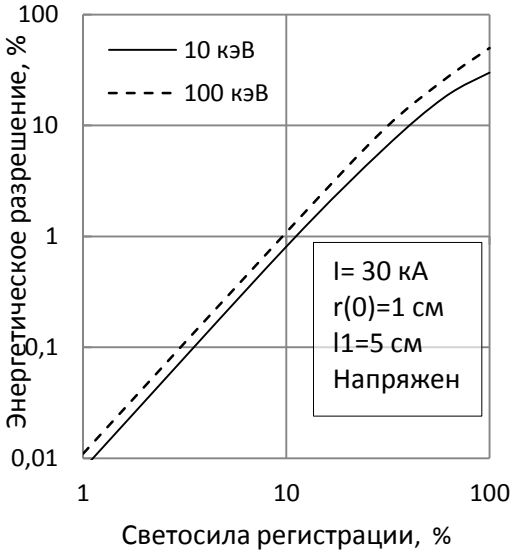
Обсуждены другие применения установки, включая исследования по физике электрических разрядов, новые технологии глубокого передела нефти и продуктов ее первичной переработки и технологии нанесения пленок и производства нано структурных композитных материалов.

Второй параграф посвящен созданию аппаратуры для изучения эффектов в сильных электромагнитных полях связанных с испусканием легких заряженных частиц—электронов и позитронов. Рассматриваются условия для наблюдения генерации электрон-позитронных пар в облучаемой лазером плазме и формулируются требования к регистрирующей аппаратуре. Лазерная плазма в рассматриваемых условиях является чрезвычайно

интенсивным источником рентгеновского и гамма излучения с энергиями квантов вплоть до величин порядка МэВ, а также корпускулярного излучения (электроны и ионы) с энергиями до единиц и десятков МэВ соответственно.

Автором предложен метод регистрации заряженных частиц основанный на их транспортировке в магнитном поле полой коаксиальной линии с током (рис.13а). Найдено аналитическое решение релятивистского уравнения движения заряженной частицы в магнитном поле вида: $B_z=B_r=0$, $B_\varphi=\mu_0 I/2\pi r$, где z, r, φ – цилиндрические координаты, I – сила тока, применительно к проблеме магнитной транспортировке заряженной частицы.





а б

Рис.13. Метод детектирования и спектрометрии заряженных частиц

Показано, что решение обладает следующими свойствами: $r(t)$ и $\varphi(t)$ и являются периодическими функциями с периодом T, зависящим от начальных условий, $z(t)$ является суммой периодической функции и произведения времени на константу, называемую скоростью дрейфа. При любых начальных условиях и любых значениях времени t справедливо неравенство:

$$e^{-\frac{2v}{a}} \leq \frac{r(t)}{r(0)} \leq e^{\frac{2v}{a}},$$

где $a=(q\mu_0 I/2\pi m)\ (1-v^2/c^2)^{1/2}$, v, q, m – скорость, заряд и масса частицы соответственно. Знак скорости дрейфа не зависит от начальных

условий, а определяется знаком произведения $I \cdot q$. Отсюда следует, что заряженная частица, испущенная в произвольном направлении точечным источником, расположенным на некотором расстоянии от оси системы, в среднем совершает движение вдоль оси, оставаясь внутри цилиндрического слоя, причём положительно и отрицательно заряженные частицы дрейфуют в противоположных направлениях.

Рассмотрены основные возможные геометрии регистрирующих систем и найдено оптимальное положение источника внутри коаксиальной линии Показана возможность достижения светосилы регистрации близкой к 100% от 4π при значительных (1 м и более) расстояниях источник – детектор.

На основе данного метода разработана и создана экспериментальная установка для исследования эмиссии частиц из лазерной плазмы. Для транспортировки частиц к детектору использовалась изогнутая коаксиальная линия длиной 2 м. Внешний проводник линии являлся также частью вакуумной камеры. Генератор импульсов обеспечивал ток в коаксиальной линии амплитудой до 80 кА и длительностью около 100 мс. Для регистрации заряженных частиц был разработан сцинтилляционный детектор со световодом и двумя вынесенными за пределы магнитного поля ФЭУ. Выполнены измерения светосилы регистрации с применением радиоактивных источников заряженных частиц, показавшие , что светосила детектирования составляет 52% от 4π, а эффективность транспортировки превышает 90%.

Приведены результаты исследования дисперсионных свойств магнитного поля коаксиальной линии. Получено общее выражение, связывающее скорость дрейфа заряженной частицы с начальным направлением вылета. При постоянной энергии заряженной частицы скорость дрейфа монотонно возрастает с увеличением азимутальной составляющей движения. Получены аналитические выражения для скорости дрейфа в двух предельных случаях — плоской и винтовой траектории. Исследована зависимость отношения максимального и минимального значения частицы в магнитном поле коаксиальной линии с током от энергии и силы тока.

Рассмотрена транспортирующая система с дополнительной диафрагмой, ограничивающей телесный угол и тем улучшающей энергетическое разрешение спектрометра. Найдена связь между светосилой и энергетическим разрешением (рис.13б) и показано преимущество данного метода над прототипами.

Приведены экспериментальные результаты исследования лазерной плазмы при интенсивностях ~10^{13} Вт/см2 и длительности импульса 50 нс. Измерения проводились с разными направлениями тока в линии. При направлении тока, соответствующем транспортировке положительно заряженных частиц существует временной интервал в течение которого детектор не подвергается воздействию фоновых излучений и может регистрировать позитроны. При противоположном направлении тока к детектору транспортируются электроны, и наблюдается сильный отрицательный сигнал. Попытки зарегистрировать позитроны при интенсивностях ~10^{13} Вт/см^2 дали отрицательный результат. На основании измеренной высокой чувствительности системы регистрации, делается вывод, что указанные значения интенсивности излучения являются недостаточными.

Приведены экспериментальные результаты по измерению энергетических спектров электронов, испускаемых лазерной плазмой. Регистрация осуществлялась с помощью коллектора зарядов с сеткой с прозрачностью 99%, установленного в конце транспортирующей линии.

В работе также предложен составной твердотельный коммутатор, который нашел применение в установках обработки воды импульсно-периодическим разрядом и системах питания клистронов – там, где требуются высоковольтные сильноточные импульсы большой длительности.

Среди различных методов, используемых для нейтрализации продуктов загрязнения и обеззараживания воды, метод импульсно-периодических электрических разрядов является весьма эффективным.
Максимальный обеззараживающий эффект при обработке воды наблюдается при следующих параметрах импульсно-периодических электрических

разрядов: длительность 1÷20 мкс, скорость нарастания тока 10^{-4}÷1 А/нс, энергия в импульсе от 0,2 до 1 Дж, частота следования импульсов 50÷100 Гц.

Для питания клистронов требуется подавать импульс высокого напряжения 20÷100 кВ длительностью порядка единиц микросекунд и частотой повторения порядка сотен герц.

Используемые ранее высоковольтные полупроводниковые коммутаторы, составленные из большого числа последовательно соединенных БТИЗ способны находится в проводящем состоянии порядка 1 мкс, вследствие особенностей схем управления. Данное ограничение обусловлено тем, что при больших длительностях импульса тока в петле управления ферритовые магнитопроводы трансформаторов управления БТИЗ достигают состояния насыщения, при этом импульс управления искажается и приводит к преждевременному переходу БТИЗ коммутатора в непроводящее состояние.

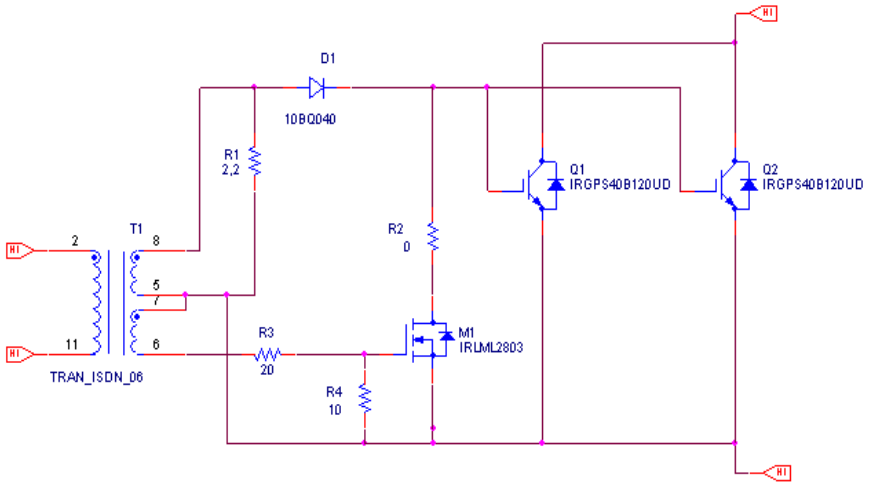


Рис.14. Коммутатор с регулируемой длительностью импульса.

В настоящей работе предлагается использовать так называемый старт-стопный метод управления БТИЗ для решения поставленной задачи. Метод основан на включении и выключении транзистора короткими разнополярными импульсами (рис.14). Для передачи таких импульсов можно использовать компактные одновитковые трансформаторы и достигать значительных длительностей в открытом состоянии (вплоть до постоянного включения, при условии повторяющихся с небольшой частотой импульсов включения).

В работе автором был разработан и создан высоковольтный твердотельный коммутатор с регулируемой длительностью импульса, способный находится в проводящем состоянии от 1 мкс и вплоть до состояния постоянной проводимости.

Основой идеей при создании этого коммутатора являлась возможность поддерживания напряжения на достаточно большой емкости затвор-эмиттер БТИЗ сразу после ее заряда и тем самым удержание коммутатора в проводящем состоянии достаточно долгое время. Это стало возможным благодаря малому току утечки затвора БТИЗ. Типичное время разряда емкости затвор-эмиттер на один вольт составляет ~30 мс. Для генерации более длинных импульсов необходимо повторно подавать стартовый импульс.

В последнем параграфе описана серия генераторов импульсов для управления электрооптическими затворами. Рассматриваются особенности построения генераторов импульсов на основе БТИЗ для их управления и представлены результаты по разработке и реализации устройств управления модуляторами добротности Nd:YAG-лазера.

В созданных модуляторах добротности на основе ячейки Поккельса достигнуты времена переключения 3,9÷4,5 нс и 7,9÷8,3 нс при коммутируемом напряжении 4 кВ и 8 кВ соответственно. При соблюдении надлежащих мер по отводу тепла от транзисторов возможна работа с частотами повторения до 100 кГц и до 1 МГц в пачке.

Применение составных твердотельных коммутаторов на базе БТИЗ позволило улучшить основные эксплуатационные параметры генераторов для электрооптических затворов по сравнению с известными аналогами. Такие генераторы могут найти широкое применение не только для управления электрооптическими затворами, но и в других областях, например для управления вытягивающей сеткой времяпролетного масс-спектрометра с задержанной экстракцией, для вывода пучка ускорителя, для систем широкополосной радиолокации и ультразвуковой локации.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложен новый подход к созданию генераторов высоковольтных импульсов наносекундного диапазона, заключающийся в использовании в качестве основного высоковольтного ключа твердотельного коммутатора, состоящего из биполярных транзисторов с изолированным затвором, соединенных последовательно–параллельно, и работающего в режиме неполного разряда накопительного конденсатора с удвоением напряжения и последующим сжатием импульса с помощью магнитного компрессора.
2. Разработаны схемы и конструкции ряда составных высоковольтных твердотельных коммутаторов (рабочее напряжение – 4÷40 кВ, ток в импульсе – 10÷200 А, времена нарастания и спада тока – 4÷50 нс) на основе последовательно-параллельно включенных биполярных транзисторов с изолированным затвором и элементов их управления.
3. Экспериментально показано, что высоковольтный твердотельный коммутатор на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором обладает свойством линейной масштабируемости характеристик методом параллельно-последовательного соединения транзисторов.
4. Впервые предложена, разработана и создана полностью твердотельная система накачки лазера на парах меди на основе составного полупроводникового коммутатора, состоящего из последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором.
5. Впервые экспериментально исследован лазер на парах меди на основе составного полупроводникового коммутатора, состоящего из последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором. Проведены экспериментальные исследования и оптимизация параметров и режимов работы высоковольтного наносекундного генератора, проведено согласование системы накачки с активным элементом лазерной системы. В результате проведенной оптимизации были достигнуты следующие выходные параметры системы накачки

лазера: амплитуда выходного напряжения – 14÷16 кВ, амплитуда тока – 180÷240 А, длительность импульсов возбуждения ~60 нс, время нарастания тока ~30 нс, частота повторения импульсов – 15÷20 кГц, средняя мощность – 2 кВт.

6. Разработан и создан компактный лазер на парах меди на основе активного элемента Kulon LT-10Cu с полностью твердотельной системой накачки, обладающий повышенным ресурсом работы и надежностью в эксплуатации. Достигнуты выходные параметры лазера: средняя мощность излучения – 12 Вт, длительность импульса – 17 нс при частоте повторения – 15 кГц, коэффициент полезного действия составил – 0,7 %.
7. Впервые разработана, создана и исследована система накачки эксимерного ArF лазера на основе высоковольтного твердотельного коммутатора состоящего из параллельно-последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором, работающего совместно с двухступенчатой системой магнитного сжатия импульсов. Система возбуждения имеет следующие параметры: амплитудное напряжение обостряющего конденсатора – 20÷27 кВ, пиковый ток заряда обостряющего конденсатора – 1,2÷1,5 кА, длительность импульса тока по полувысоте – 70 нс, время нарастания выходного напряжения (по уровню 0,1/0,9) – 60 нс, частота повторения импульсов – 2 кГц, средняя мощность, отдаваемая в нагрузку – 2 кВт.
8. Экспериментально исследован эксимерный ArF лазер с разработанной и созданной твердотельной системой накачки. Достигнуты следующие основные параметры лазера: длительность импульса – до 18 нс, энергия излучения в импульсе – до 15 мДж, средняя мощность излучения на длине волны 193 нм – до 10 Вт при частоте повторения импульсов – 1 кГц, размер пучка – 5×12 мм, расходимость пучка – 2×4 мрад.
9. Реализован метод, позволяющий использовать схему с нелинейными формирующими линиями для управления длительностью импульса накачки при сохранении малого времени нарастания, который

обеспечивает формирование более однородных самостоятельных разрядов с увеличенной длительностью и снижение расходимости пучка.

10. Разработан, создан и исследован высоковольтный твердотельный генератор импульсов для питания высокочастотного барьерного разряда и эффективного возбуждения электрогидродинамических газовых потоков. Впервые разработано, создано и исследовано устройство электрической прокачки газа с системой питания на основе предложенного высоковольтного генератора импульсов. Создан плазменный эмиттер ионов с эффективной площадью 60 $см^2$ и величиной ионного тока до 2 мА. В атмосферном воздухе достигнута скорость потока ≈ 1,5 м/с и рекордная величина расхода более 12 л/с.
11. Впервые предложен и теоретически и экспериментально обоснован метод регистрации и спектрометрии заряженных частиц на основе их транспортировки от источника к детектору в магнитном поле линейного тока. Показана возможность достижения предельно высокой светосилы в широком диапазоне энергий частиц и расстояний источник – детектор. Разработана, создана и исследована система регистрации и спектрометрии легких заряженных частиц, испускаемых лазерной плазмой, на основе полой коаксиальной линии, по которой пропускается импульсный ток. Достигнуты значения светосилы регистрации более 50% в диапазоне энергий 0,1÷3 МэВ при сохранении высокой степени защищенности детектора от фоновых излучений источника.
12. На основе высоковольтного твердотельного коммутатора состоящего из параллельно-последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором разработаны и созданы генераторы импульсов для питания электрофизических установок, включая установки для очистки воздуха и воды и для исследования взаимодействия электронных релятивистских пучков и электромагнитного излучения сверхвысокой интенсивности с плазмой, а также генераторы для систем управления электрооптическими затворами.

Список цитированной литературы

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Советское Радио. 1974. 256 с.

2. Грехов И.В. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника // Вестник российской академии наук. 2008. Т.78. №2. С. 106-131.

3. Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester (UK): John Willey & Sons Ltd., 1998. 620 p.

4. Батенин В.М., Бойченко А.М., Бучанов В.В., Евтушенко Г.С., Казарян М.А., Карпухин В.Т., Климовский И.И., Маликов М.М. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – 2. В 2 т., Т.2 Под ред. В.М. Батенина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 611 с.

5. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005. 312 с.

6. Willis W. L.: “Pulse-Voltage Circuits”, Chapter 3 de “High Power electronics”, Editor Dollinger R. E.; Sarjeant, W. James, Tab Books Inc., 1st Edition, 1989, ISBN 0-8306-9094-8.

Список основаных научных работ по диссертации:

7. Иванов Е. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. Магнитотранзисторный генератор для питания лазера на парах меди // Приборы и техника эксперимента. 2006. №1. С. 88— 90.

8. Иванов Е. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе составного твердотельного коммутатора // Прикладная физика. 2006. №2. С. 122— 126.

9. Иванов Е. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором. // Препринт ИПЭФ РАН. М., 2004. 50 с.

10. Долгачёв Г.И., Масленников Д.Д., Мижирицкий В.И.,Недосеев С.Л., Смирнов В.П., Завадцев А.А., Нистратов В.М., Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Ишмухаметов А.З. Экспериментальная установка «Эхо» для модифицирования гетерогенных органических сред совместным действием

электрического разряда и электронного пучка // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2008. №.1. С. 57— 68.

11. Иванов Е.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Грязнов О.В. Генератор накачки эксимерного лазера на основе высоковольтного твердотельного коммутатора //Прикладная физика. 2008. №5. С.32— 34

12. Вартапетов С.К., Грязнов О.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Электроразрядный ВУФ лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая Электроника, 2009. Т.39. №8. С. 714 – 718.

13. М.В. Малашин, С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич Генератор накачки лазера на парах меди на основе высоковольтного твердотельного коммутатора // Прикладная физика. 2010. № 5. С. 127 – 132.

14. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Удлинение импульса ВУФ излучения электроразрядного ArF-лазера с твердотельным генератором накачки // Квантовая Электроника, 2011. Т.41. №4. С. 366 – 369.

15. Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Электрогидродинамический эффект, получаемый при высокочастотном барьерном разряде в газе //Прикладная физика. 2011.№ 6.С.222 – 231.

16. Аполлонов В.В., Мошкунов С.И., Прохоров А.М. Метод транспортировки заряженных частиц от источника к детектору с эффективностью, близкой к 100%. // Письма в ЖТФ, 1985. Т., вып.13, С. 733— 777.

17. Аполлонов В.В., Калачев Ю.А., Мошкунов С.И., Прохоров А.М., Суздальцев А.Г. Дрейфовый магнитный сепаратор для исследования генерации электрон-позитронных пар в лазерной плазме // Квантовая электроника 1986. Т.13. №3. С. 643 — 645.

18. Аполлонов В.В., Беляев В.Н., Мошкунов С.И., Темников В.И. Регистрация заряженных частиц с помощью дрейфового магнитного сепаратора // Письма в ЖТФ, Т.13. вып.5. 1987. С. 309— 312.

19. Евтушенко С.Д., Мошкунов С.И., Сисакян И.Н., Хомич В.Ю.

Светосильный метод измерения энергетических спектров электронов. Письма в ЖТФ, Т.16. вып.19. 1990. С. 47 — 51.

20. Мошкунов С.И., Петрушин А.Н., Хомич В.Ю. О точности определения параметров тонких плёнок методом возбуждения поверхностных плазмонов // Известия РАН. Серия физическая. 1992. Т.56. №4. С. 212— 215.

21. Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю. Управление электрооптическими затворами с помощью высоковольтных коммутаторов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором [Электронный ресурс] // Исследовано в России. 2011. URL: http://zhurnal.gpi.ru/articles/2011/015.pdf (дата обращения: 04.07.2011).

22. Мошкунов С.И., Сисакян И.Н., Хомич В.Ю. Способ определения спектра заряженных частиц. Авторское свидетельство №1568750. СССР, 1988. Приоритет от 19.09.88.

23. Мальцев А.В., Мошкунов С.И., Неймарк В.М., Прохоров А.М., Сисакян И.Н. , Хомич В.Ю. Устройство для регистрации заряженных частиц. Авторское свидетельство №1602211. СССР, 1988. Приоритет от 19.09.88.

24. Apollonov V.V., Belyaev V.N., Kalachev Yu.L., Moshkunov S.I., Suzdaltsev A.G., Temnikov V.I. Magnetic drift separator for study of electron-positron pair production in laser produced plasma // In High Intensity Laser Processes Ed. by J.A. Alcock. Proceedings of SPIE Vol. 0664. 1986. ISBN. 9780892526994. 327 p. P.243 — 248.

25. Moshkunov S. I., Petrushin A. N. and Khomich V.Y. Method of thin film thickness and constants measurement by surface plasmons excitation // Proceedings of SPIE Vol.1723,; doi:10.1117/12.58649. 1992. P.157—159.

26. Иванов Е.В.,. Малашин М. В, Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. Лазер на парах меди с полностью твердотельной системой накачки // Сборник трудов симпозиума "Лазеры на парах металлов" (ЛПМ-2008), Лоо. 20 – 26 сентября 2008. С. 65.

27. Мошкунов С.И. Новый подход к созданию твердотельных систем накачки лазеров на парах металлов // Сборник трудов симпозиума "Лазеры на парах металлов" (ЛПМ-2010), Лоо, 20 – 24 сентября 2010 г., . С.65.

28. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. Система накачки лазера на парах меди на основе составного твердотельного коммутатора // Сборник трудов симпозиума "Лазеры на парах металлов" (ЛПМ-2010), Лоо, 20 – 24 сентября 2010 . С.64.

29. Иванов Е.В., Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В.Ю. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе составного твердотельного коммутатора // Сборник трудов международной конференции Лазерные технологии XXI века (ФИ РАН – ИОФ РАН – Бело АН), Москва, 2007. С. 211.

30. Вартапетов С.К., Грязнов О.В., Иванов Е.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Электроразрядный эксимерный лазер с полностью твердотельным магнитным генератором накачки // Сборник трудов международной конференции Лазерные технологии XXI века (ФИ РАН – ИОФ РАН – Бело АН), Москва, 2007. С. 212.

31. Moshkunov S. I. A New Approach for developing highly effective Solid— State HV Pulse Generators for Laser Pumping. // Book of abstracts, 17th International Conference on Advanced Laser Technologies ALT’09. Antalya. 2009. P.233.

32. Khomich V. Yu., Malashin M. V., Moshkunov S. I., Shershunova E. A. High voltage solid-state pumping source for excimer laser.// Book of abstracts, 17th Intern. Conference on Advanced Laser Technologies ALT’09. Antalya. 2009. P. 68.

33. Khomich V.Yu., Moshkunov S.I. Solid state, Nanosecond, High Repetition Rate, Pulse Generator for Copper Vapor Laser Pumping // Book of abstracts, 8th International Conference on Power Electronics (ICPE2011 - ECCE Asia). Daejeon, Korea, 2011. P.121.

34. Moshkunov S.I. High-voltage, high-speed solid-state switches for Pockels cell drivers // Book of abstracts of International Conference on Computer, Electrical, and Systems Sciences, and Engineering (ICCESSE'11), Bangkok, 2011", P.96.

35. Аполлонов В.В., Калачев Ю.Л., Мошкунов С.И., Пугач В.М., Светличный П.Н., Ткач Н.М., Хильченко А.Д., Компьютеризированная система идентификации и спектрометрии заряженных частиц в интенсивных импульсных потоках // Тезисы доклада 37-го совещания "Ядерная спектроскопия и структура атомных ядер", Юрмала, 1987, С.536.

36. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. Генераторы наносекундных импульсов на основе твердотельной элементной базы для питания газоразрядных приборов / Препринт ИЭЭ РАН. М., 2005. 29 с.

37. Иванов Е.В., Мошкунов Е.В., Хомич В.Ю. Исследование системы накачки лазера на парах меди, созданной на основе твердотельного коммутатора / Препринт ИЭЭ РАН. М., 2005. 12 с.

38. М.В. Малашин, С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич. Разработка, создание и исследование лазера на парах меди с системой накачки на основе твердотельной элементной базы / Препринт ИЭЭ РАН. М.: 2009. 29 с.

39. Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. Исследование процессов образования электрогидродинамического газового потока при горении высокочастотного барьерного разряда в газе / Препринт ИЭЭ РАН. М.: 2009. 59 с

40. Rebrov I.E., Khomich V.Yu., Malashin M.V., Moshkunov S.I. Cooper vapor laser (510 and 578 nm wavelengths) for micro processing and nanostructuring of superhard materials // Book of abstr. 8th Internat. Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN11). Thessaloniki, Greece, 2011. P.124.