

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу  
**Гугина Павла Павловича** «Исследование коммутационных характеристик открытого разряда, генерирующего встречные электронные пучки», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника

Диссертационная работа Гугина П.П. посвящена исследованию открытого разряда, создаваемого встречными электронными пучками, для его дальнейшего применения в высокоскоростных коммутаторах тока и напряжения с длительностью нарастания фронта импульса напряжения менее 1 нс, а также их применения для накачки импульсных газоразрядных лазеров, в частности, лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов. При воздействии на газ или плазму высоковольтных импульсов с фронтами менее 1 нс возникают новые эффекты, такие как генерация потоков электронов высоких энергий и реализуются новые механизмы пробоя и развития разряда, такие как высокоскоростные волны ионизации и диффузный объемный разряд вплоть до высоких давлений. Именно этим новым направлением физики газоразрядной плазмы и определяется **актуальность темы** данной диссертационной работы. Исследование физических процессов в перспективной для практического применения разновидности импульсного высоковольтного разряда – открытом разряде – является актуальной задачей в целом. В работе изучены механизмы, позволяющие значительно увеличить скорость нарастания тока по сравнению с известными результатами для этого типа разряда. Строится качественная модель, тем не менее, позволяющая оценить возможности применения на практике устройств на данной основе. Практическим результатом работы можно считать высоковольтный субнаносекундный высокоэффективный коммутатор, который может найти широкое применение в экспериментальной физике и ряде областей техники, что также продемонстрировано в работе. Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнений.

### **Оценка содержания работы и её завершенности**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 159 страниц с 56 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 197 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, проводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цель и задачи работы, приводятся её научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен аналитический обзор литературы об открытом разряде, его применениях для накачки лазеров и особенностях накачки лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов. На основе литературного

обзора сделан вывод, что одной из нерешённых фундаментальных проблем лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов является то, что при повышении частоты повторения импульсов высокого напряжения увеличивается концентрация электронов в разрядном объеме перед следующим импульсом накачки, что приводит к нежелательному заселению нижнего рабочего лазерного уровня на фронте импульса возбуждения. Формулируются требования к форме импульса возбуждения и устройству, способному сформировать требуемый импульс. На основе анализа литературных данных, данную проблему предлагается решить путем уменьшения длительности фронта импульса напряжения до величины порядка 1 нс. Из подробного анализа существующей коммутационной элементной базы сделан вывод о необходимости разработки более совершенных устройств для достижения этой цели. За основу предлагается взять открытый разряд, наиболее перспективный с точки зрения масштабируемости и преобладания фотоэмиссии с катода, как основного поставщика электронов, что обеспечивает низкий износ катода и достижения высокого ресурса устройств.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию возможности генерации встречных электронных пучков в коаксиальной геометрии электродов на основе механизмов, присущих открытому разряду. Делается анализ правомерности такого перехода. Следует отметить подробное описание методики подготовки экспериментальных образцов, которая во многом обеспечила надежную воспроизводимость и прогнозируемость результатов. Дается анализ достижимой частоты следования импульсов, средней мощности и общей применимости таких коммутаторов. Впервые показано, что наличие встречных электронных потоков не меняет тип разряда, но вместе с тем запускает механизм осцилляции электронов внутри цилиндрической полости, чем усиливает поток фотоизлучения на катод и позволяет повысить скорость нарастания тока. Получены рекордные характеристики открытого разряда: амплитуда тока 26 кА при напряжении 12 кВ и пиковой мощности разряда 250 МВт.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментов по сравнительному исследованию влияния различных конструктивных параметров и рабочих условий на развитие открытого разряда в целом и на его коммутационные характеристики. Выделены и описаны механизмы фотоэмиссии под действием резонансного излучения с доплеровским сдвигом быстрых атомов, образующихся в процессах перезарядки ионов. Найдены условия, при которых в дополнение к фотоэмиссии реализуется механизм вторичной электронной эмиссии, значительно ускоряющий развитие тока. Сделана оценка их влияния на развитие разряда и процесс коммутации. Всестороннее изучение процессов в открытом разряде позволило добиться лучших мировых характеристик, в частности, снижения времени коммутации до ~100 пс при напряжении 20 – 30 кВ. Достигнутые параметры достаточны для решения поставленной в первой главе задачи по оптимальной накачке лазера на парах меди при повышении частоты следования импульсов.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментальных исследований влияния длительности фронта импульса возбуждения на характеристики лазера на парах меди с применением в цепи накачки описанного в третьей главе коммутатора. Показано значительное улучшение частотно-энергетических характеристик лазера при частоте следования 16 кГц в случае импульсов напряжения с фронтом 1-2 нс. Реализованы три схемы применения данных устройств в реальной эксплуатации при высокой средней частоте повторения импульсов и высокой коммутируемой пиковой и средней мощности. Предложена и реализована схема сжатия фронта импульсов напряжения с помощью двух ступеней на основе открытого разряда.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты работы.

### **Следует отметить следующие полученные результаты**

Разработаны различные конструкции открытого разряда со встречными потоками высокоэнергетичных электронов и показана возможность их применения в качестве высокоскоростных коммутаторов с рекордными характеристиками по времени нарастания фронта импульса напряжения, амплитуде импульсов тока, пиковой мощности, частоте следования импульсов.

Экспериментально показано, что применение коммутатора на основе открытого разряда для уменьшения фронта импульса напряжения до 1,5 нс позволяет обеспечить сохранение энергии импульса излучения лазера на парах меди до частоты следования импульсов не менее 16 кГц. Созданы и исследованы несколько типов коммутаторов.

Коммутатор на основе открытого разряда со встречными электронными пучками может работать как с высокоимпедансными нагрузками, так и с низкими сопротивлениями 2 Ом, при этом падение напряжения на коммутаторе в начальный момент крайне низкое, около 100 В.

На основе двух открытых разрядов со встречными пучками электронов создан двухступенчатый компрессор фронта высоковольтных импульсов напряжения со степенью сжатия 500 и длительностью фронта выходного импульса 0,1 нс.

### **Научная и техническая новизна**

Научные результаты, перечисленные в соответствующем разделе диссертации, являются новыми.

1. Проведено сравнительное исследование классического открытого разряда и открытого разряда, генерирующего встречные электронные пучки. Определены механизмы, отвечающие за ускорение развития тока эмиссии. Продемонстрирована возможность эффективной субнаносекундной коммутации тока на основе данного типа разряда.
2. Определен дополнительный эмиссионный механизм – вторичная электрон-электронная эмиссия, развивающийся в режиме коммутации в устройствах на основе открытого разряда со встречными электронными пучками.

Исследованы условия, при которых данный механизм может стать доминирующим, значительно ускоряя коммутацию.

3. Экспериментально определены оптимальные конструктивные особенности коммутаторов, обеспечивающие эффективность и скорость коммутации на различные типы нагрузок. Достигнут конструктивный предел скорости коммутации.
4. Создан быстродействующий коммутатор высоковольтных импульсов напряжения с амплитудой до 100 кВ, временем нарастания 0,1-3 нс и частотой десятки кГц на основе открытого разряда со встречными потоками электронов высоких энергий.
5. Создан двухступенчатый компрессор фронта высоковольтных импульсов напряжения со степенью сжатия 500 и длительностью фронта выходного импульса 0,1 нс.

### **Достоверность и обоснованность научных положений и выводов**

Экспериментальные данные были получены с использованием проверенных средств диагностики и современного измерительного оборудования, обеспечивающих высокую надежность и необходимую точность измерений. Достоверность результатов анализа обеспечивается проверкой работы всех систем на ранее изученных системах, взаимной согласованностью экспериментальных данных, получаемых при помощи различных диагностических методик, их воспроизводимостью, а также согласованностью с имеющимися данными других авторов. В работе представлено большое количество экспериментальных данных, согласующихся с предлагаемыми моделями. Также достоверность научных положений и выводов подтверждена их обсуждением на научных отечественных и международных конференциях и публикациями в ведущих рецензируемых журналах, в том числе из первого квартала.

Результаты работы изложены в 24 публикациях, из которых 20 – статьи в отечественных и зарубежных изданиях, индексируемых в Scopus, WoS и РИНЦ, в том числе первого квартала, и рекомендованных ВАК, одна глава в коллективной монографии и 2 патента на изобретения.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты работы имеют практическое значение, так как демонстрируют особенности развития открытого разряда в широком диапазоне рабочих условий, конструктивных особенностей. Детально изучены процессы от самого зажигания до ограничения, обусловленного собственными характеристиками ячейки. Результаты работы обеспечивают обширный материал для моделирования такого типа разряда. Очевиден и вклад в развитие физики газоразрядных лазеров. Практическая значимость заключается в создании высокоскоростных газоразрядных коммутаторов, которые можно применять для накачки лазеров и в генераторах высоковольтных импульсов при высокой частоте повторения

импульсов и высокой средней мощности. Практическая значимость подтверждена двумя полученными патентами на изобретения.

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

С фундаментальной точки зрения экспериментальные данные работы могут быть использованы для численного моделирования и теоретического анализа газового разряда в сильных электрических полях.

Практическое применение результатов заключается в непосредственном внедрении и использовании исследованных устройств в генераторах импульсных напряжений и использования плазмы на встречных электронных пучках для поперечной накачки газовых лазеров.

### **По тексту диссертации есть несколько непринципиальных замечаний**

1. Импульсы напряжения и тока измерялись резистивными делителями напряжения и шунтами. Однако в диссертации не указана методика их калибровки и проверки времени нарастания. Не указано, была ли проверена линейность делителей и шунтов от амплитуды импульсов, их длительности и частоты следования. Для шунтов с субнаносекундными временами нарастания это связано с нагревом шунта и скинированием тока. Не приведены прямые измерения спектров пропускания измерительных цепей, хотя в некоторых экспериментах граничная частота должна быть не менее 5 ГГц, что сложно достижимо при использовании резистивных делителей напряжения.

2. В обзоре литературы не дана конкретная ссылка, подтверждающая необходимость уменьшения фронта высоковольтного импульса напряжения для накачки лазера на парах меди.

3. С одной стороны, дано подробное описание подготовки ячеек и указывается важность чистоты условий, с другой стороны, в ряде экспериментов описывается использование смеси с водородом, но не дается подробного объяснения взаимодействия водорода и гелия, приводящее к полученным результатам.

4. В разделе 2.2.3 при анализе потоков электронов и экспериментально полученных импульсов напряжения и тока на рисунке 2.4 энергия генерируемых электронов принимается равной 10 кэВ, однако не приводится обоснование для выбора этой величины, а в главе 2 метод диагностики электронов пучка не указан.

Сделанные замечания не влияют на основные положения диссертации и не снижают высокого научного уровня проведенных исследований.

### **Заключение**

На основании полученных диссертантом результатов, сделанных выводов и выдвинутых научных положений следует считать, что поставленная цель исследований успешно достигнута. Диссертационная работа Гугина Павла

исследований успешно достигнута. Диссертационная работа Гугина Павла Павловича выполнена на высоком научном и техническом уровне, в ней получены новые научные результаты, имеющие научную и практическую значимость. Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат правильно отражает основные результаты диссертации. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Диссертация Гугина Павла Павловича является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной проблемы физической электроники, соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник лаборатории плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), доктор физико-математических наук, профессор

Василяк Леонид Михайлович.

15 ноября 2023 г.

Почтовый адрес: 125412, Москва, улица Ижорская, дом 13, строение 2  
Телефон: +7(495) 4841810, Адрес электронной почты: vasilyak@ihed.ras.ru

Подпись г.н.с. ОИВТ РАН, д.ф.-м.н, профессора Л.М. Василяка заверяю:

Ученый секретарь ОИВТ РАН  
доктор физико-математических наук



Киверин А. Д.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2. Тел. (495) 4841810  
Адрес электронной почты: alexeykiverin@gmail.com  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)