



**Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ  
Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИЭФ УрО РАН)**

Амундсена ул., д.106, г.Екатеринбург, 620016  
Тел. (343) 267-87-96 Факс (343) 267-87-94  
ОКПО 04839716 ОГРН 1026604936929  
ИНН/КПП 6660007557/667101001

д.в. 10. 2023 г. № 16346- 1256-263

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИЭФ УрО РАН  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

С.А. Чайковский Чайковский С.А.

«13» сентября 2023 г.



### ОТЗЫВ

ведущей организации «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук» (ИЭФ УрО РАН) на диссертационную работу Гугина Павла Павловича «Исследование коммутационных характеристик открытого разряда, генерирующего встречные электронные пучки», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

### Актуальность темы

Диссертационная работа Гугина П.П. посвящена исследованию физических процессов, отвечающих за субнаносекундную коммутацию в оригинальном типе газового разряда – открытом разряде, генерирующим встречные электронные пучки. Важными особенностями этого разряда являются функционирование в газе среднего давления (единицы-десятки Торр) и преобладание фотоэмиссии, обеспечивающей низкое распыление катода при высокой эффективности генерации электронного пучка, что приводит к эффективной передаче энергии в нагрузку. В работе исследуются механизмы эмиссии и развития разряда в широком диапазоне условий, что важно для понимания как самих процессов, так и возможных областей использования устройств на основе открытого разряда не только в качестве коммутаторов, но и непосредственно самого разряда, например, как части составного газоразрядного устройства в качестве источника плазмы или пучков быстрых электронов. Достигнутые в работе характеристики исследованных устройств и примеры практического их применения показывают перспективность применения приборов на основе открытого разряда со

встречными пучками в соответствующих научных и технических задачах. Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнений, а ее практические результаты имеют широкие перспективы практического применения.

### **Оценка содержания работы и её завершённости**

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

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, приводится 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 на основе литературных источников формулируются требования к идеальному с точки зрения природы активной среды импульсу возбуждения лазеров на самоограниченных переходах, в частности, атома меди. На этой основе формируются требования к коммутационному устройству, необходимому для формирования требуемого импульса с учетом особенностей активного элемента лазера. Проводится литературный обзор современной элементной базы на предмет удовлетворения всего набора требований.

Во второй главе экспериментально исследован и обоснован переход от классического открытого разряда с одним ускорительным зазором к разряду с двумя встречно расположенными зазорами. Приведена качественная оценочная модель такого перехода. Описаны первые эксперименты по применению данного типа разряда для коммутации тока и передачи энергии в нагрузку в режиме компрессии импульсов. Дана оценка применимости коммутаторов в условиях высокой частоты повторения и средней коммутируемой мощности. Кроме того, приводятся подробные сведения по методике подготовки экспериментальных ячеек и средств регистрации, обосновывающие достоверность и воспроизводимость полученных в работе результатов.

В третьей главе подробно исследуется влияние экспериментальных условий на свойства коммутатора. Рассматривается широкий диапазон давлений рабочего газа гелия от 2 до 120 Торр, влияние геометрии расположения ускорительных зазоров и наличия дрейфового пространства между ними, материалов катода с точки зрения их эмиссионных свойств, а также особенностей анодной сетки. Наиболее важным результатом, изложенным в данной главе, является обнаружение условий, при которых развивается механизм вторичной электрон-электронной эмиссии, который становится доминирующим в развитии тока. Все это позволило достичь предела коммутационных характеристик исследуемых устройств, который

определяется только их конструкционными особенностями. В реализованном диссертантом варианте получено время коммутации 80 пс.

В четвертой главе описаны эксперименты практического применения рассмотренных выше устройств. Наиболее важным является эксперимент по сравнительному исследованию частотно-энергетических характеристик лазера на парах меди при возбуждении импульсами с различной длительностью переднего фронта. Показано, что применение в разрядной цепи лазера коммутатора на основе открытого разряда со встречными пучками в качестве обострителя фронта импульса напряжения позволяет добиться независимости энергии в импульсе излучения от частоты следования импульсов в диапазоне по крайней мере до 16 кГц, тогда, как при отсутствии этого звена энергии излучения начинает уменьшаться уже при 6 кГц. Таким образом, обозначенная в первой главе проблема эффективного возбуждения лазера на парах меди получила техническое решение, отсутствовавшее ранее.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

В целом, изложение материала логически обосновано, материал излагается последовательно, а работа соответствует специальности 1.3.5. -физическая электроника.

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

Достоверность работы основана на большом количестве экспериментальных данных, согласованных между собой, с численными оценками и результатами моделирования. В работе приводится подробная методика подготовки экспериментальных установок и цепей регистрации. Видна последовательность развития методик проведения экспериментов по мере накопления данных и усложнения моделей.

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 квартиля, одна глава в коллективной монографии и 2 патента на изобретения. Кроме того, результаты докладывались на нескольких российских и международных конференциях.

#### **Научная и техническая новизна**

1. Проведено сравнительное исследование классического открытого разряда и открытого разряда, генерирующего встречные электронные пучки. Определены механизмы, отвечающие за ускорение развития эмиссии электронов из катода. Продемонстрирована возможность эффективной субнаносекундной коммутации на основе данного типа разряда.

2. Определен дополнительный эмиссионный механизм – вторичная электрон-электронная эмиссия, возникающий в режиме коммутации в устройствах на основе открытого разряда со встречными электронными пучками.
3. Экспериментально определены оптимальные конструктивные особенности коммутаторов, обеспечивающие эффективность и скорость коммутации на различные типы нагрузок.
4. Полученный экспериментально набор характеристик коммутаторов является уникальным для этого класса устройств.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты работы расширяют понимание элементарных процессов в открытом разряде с генерацией встречных электронных пучков и открывают перспективы создания нового класса высоковольтных сильноточных коммутаторов, способных работать на высокой частоте следования импульсов с различным типом нагрузок. Отдельно нужно отметить значение данной работы для физики импульсных газовых лазеров, продемонстрированное экспериментально.

### **Недостатки**

1. Вторичная электрон-электронная эмиссия (ВЭЭЭ) в качестве доминирующего эмиссионного процесса при субнаносекундных временах развития разряда обосновано недостаточно полно. Уменьшение времени пробоя за счет применения катода с высоким коэффициентом ВЭЭЭ может быть объяснено так же повышением коэффициента фотоэмиссии, что не обсуждалось в работе.
2. Показано, что включение в электрическую цепь схемы возбуждения лазера разрядника на основе открытого разряда (ОР) приводит к увеличению одного из наиболее важных параметров - частоты следования импульсов при сохранении энергии в импульсе. Это обусловлено увеличением заселенности верхнего лазерного уровня и уменьшением заселенности нижнего лазерного уровня. Это должно привести к увеличению КПД лазера. Однако, в работе сведения об этом не приводятся.
3. Нет прямого доказательства влияния эффекта Доплера на эмиссию электронов с катода, поскольку доплеровский сдвиг длины волны излучения открытого разряда был продемонстрирован на длине волны 501 нм, а не на резонансной частоте рабочего газа гелия 58.4 нм, определяющей фотоэмиссию. Кроме того, не рассмотрено влияние излучения эксимерной молекулы  $He_2^*$ , в образовании которой участвуют метастабильные уровни He, аккумулирующие значительную энергию разряда.

4. Наиболее близким аналогом коммутатора на основе ОР в импульсной технике является газовый разрядник высокого давления с поперечной каналу прокачкой газа. Такое устройство обеспечивает фронт импульса выходного напряжения около 1 нс и менее, коммутирует импульсную мощность в диапазоне  $10^8$ - $10^9$  Вт и может работать с частотой следования импульсов в единицы кГц. Следовало бы в качестве аналога взять именно такой разрядника и провести сравнение его преимуществ и недостатков с разрядником на основе ОР.
5. Поскольку коммутатор на основе ОР представляет собой неуправляемый коммутатор-обостритель, необходимо было привести одну из основных его характеристик. Это классическая вольт-секундная характеристика, связывающая напряжение пробоя коммутатора и время нарастания напряжения до пробоя. Это тем более уместно, поскольку в приведенных схемах генераторов вместе с ростом напряжения на коммутаторе происходит и рост напряжения на накопителе второго звена ( $C_p$ ). Поэтому напряжение срабатывания коммутатора будет определять квадратичным законом энергию накопителя, которая будет вводится в газовый разряд. Было бы уместно привести семейство таких характеристик, полученных при различных давлениях остаточного газа в коммутаторе на основе ОР.
6. Имеются недостатки в представлении материала.

#### Защищаемые положения.

Положение 1 "... по крайней мере, на порядок возрастает скорость развития тока...". Следует указать численно диапазон возрастания, например "от 5 до 12 раз".

#### Научная новизна.

Пункт 3. "высокие коммутационные характеристики". Так же нужно привести численные значения или показатели по основным характеристикам.

Пункт 5. "Разработаны основы применения...". Нужно конкретизировать о каких основах идет речь, например, "схемотехнические и эксплуатационные".

Неточность написания формулы (2) в автореферате.

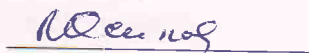
### **Заключение**

На основании полученных диссертантом результатов, сделанных выводов и выдвинутых научных положений следует считать, что поставленная цель исследований успешно достигнута. Диссертационная работа Гугина Павла Павловича выполнена на высоком научном уровне. Текст диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат правильно отражает основные результаты диссертации. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Диссертация Гугин Павла Павловича является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной проблемы физической электроники, что соответствует требованиям п. 9 «Положений 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 искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника

Материалы диссертации Гугина П.П. "Исследование коммутационных характеристик открытого разряда, генерирующего встречные электронные пучки", а также отзыв на диссертацию рассмотрены на расширенном семинаре Лаборатории квантовой электроники ИЭФ УрО РАН 23 октября 2023 года (Протокол № 6).

Заведующий Лабораторией квантовой  
электроники ИЭФ УрО РАН, д.ф.-м.н.,  
член-корреспондент РАН



Осипов Владимир Васильевич  
« 23 » октября 2023 г.

Подпись В.В.Осипова удостоверяю:  
учёный секретарь ИЭФ УрО РАН,  
к.ф.-м.н.



Кокорина Елена Евгеньевна  
« 23 » октября 2023 г.