

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 экспериментальному исследованию коммутационных свойств открытого разряда с генерацией встречных электронных пучков и разработке на этой основе коммутационных устройств и принципов их применения на примере накачки активной среды лазеров на парах меди импульсами с фронтом нарастания порядка 1 нс.

Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов являются одними из наиболее эффективных и качественных источников когерентного излучения в видимой области спектра и находят широкое применение в медицине, прецизионной микрообработке материалов, неразрушающем контроле, дистанционном лазерном зондировании атмосферы и других. Данный тип лазеров к настоящему времени изучен достаточно хорошо, разработаны математические модели их работы, хорошо согласующиеся с экспериментом. Однако по-прежнему остаётся нерешенным вопрос о том, что полученные в эксперименте эффективность генерации и погонная мощность на порядок уступают предсказанным теоретически. Одним из главных механизмов, приводящих к указанным проблемам, указывается накопление достаточно высокой концентрации электронов при характерном для этих лазеров импульсно-периодическом режиме работы, которые, медленно разогреваясь на фронте импульса напряжения, активно заселяют нижние рабочие уровни атомов, и таким образом снижают инверсию населённостей. Для решения этой проблемы предложено возбуждать активную среду импульсами напряжения с фронтом порядка 1 нс для того, чтобы как можно быстрее разогреть эти электроны до энергии, при которой наиболее эффективно идёт заселение резонансного уровня. Соответственно, требуется разработка нового класса высоковольтных коммутаторов, с помощью которых можно было бы эффективно генерировать импульсы с нужными характеристиками и, желательно, с

малыми потерями. В качестве основы для такого устройства было в диссертации предложено использовать генератор электронного пучка на основе открытого разряда со встречными электронными пучками. Изучение этого режима функционирования открытого разряда даёт основания предполагать, что данный физический принцип позволит разработать устройство с требуемыми характеристиками по времени переключения, достижимой скорости нарастания тока, достичь высоких частот следования импульсов за счёт быстрой рекомбинации плазмы после прохождения тока. Кроме того, это делает перспективным его использование не только в генераторах накачки лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, но и в ряде других научных и технических задач, где требуется генерация высоковольтных нано- и субнаносекундных электрических импульсов с характерной импульсной мощностью в десятки и сотни МВт при частоте повторения вплоть до 100 кГц. Таким образом, актуальность работы не вызывает сомнений.

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 представлена актуальность работы, приводится краткий обзор предлагаемого автором решения, формулируются цель и задачи работы, приводятся её научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан краткий литературный обзор о лазерах на самоограниченных переходах атомов металлов, в котором указывается одна из их главных проблем, мешающая их развитию, а именно паразитное заселение нижних рабочих уровней на фронте возбуждения. Это явление оказывает негативное влияние на генерационные характеристики таких лазеров при увеличении частоты. Делается предположение, что резкое укорочение фронта импульса накачки может компенсировать рост концентрации электронов между импульсами. Приводятся характеристики коммутатора, с помощью которого можно было бы получить необходимую форму импульса на такой нагрузке, как активный элемент лазера. С этой позиции делается подробный обзор источников, посвященных высоковольтной коммутационной технике, в том числе применительно к

возбуждению лазеров на парах металлов. Делается вывод о том, что на данный момент не существует коммутатора, способного обеспечить необходимое сочетание характеристик и предлагается разработать новый коммутационный прибор на основе оригинального сочетания физических принципов, характерных для открытого разряда.

Во второй главе приводится обзор методики подготовки экспериментальных образцов и измерительных цепей для обоснования высокой воспроизводимости результатов. Далее описываются эксперименты по генерации встречных электронных пучков в открытом разряде и по коммутации тока. Автор проводит обоснование перехода от классического открытого разряда к открытому разряду с генерацией встречных электронных пучков. Также здесь приводится предварительная оценка применимости данных экспериментальных устройств для накачки лазеров с точки зрения удельной мощности и предполагаемого срока службы с учетом фотоэмиссионной природы их функционирования.

Третья глава посвящена экспериментам по оптимизации разрядной структуры за счет геометрии, материалов и экспериментальных условий. В частности, обосновывается отказ от дрейфового пространства, характерного для классического открытого разряда. Определяются границы применимости по основным параметрам. Обнаруживается вторичная электронная эмиссия, возникающая при коммутации тока в нагрузку. Строится модель развития и быстрой коммутации открытого разряда со встречными электронными пучками с учетом всех обнаруженных явлений. Достигаются коммутационных характеристики, которые гарантированно перекрывают необходимые для возбуждения лазера.

В четвертой главе проводится экспериментальная проверка выдвинутого в первой главе предположения о влиянии длительности фронта импульса на частотно-энергетические характеристики лазера на парах меди. Показывается, что укорочение фронта с 25 нс до 1,5 нс позволяет более, чем в два раза расширить частотный диапазон эффективной работы лазера. Кроме того, в данной главе описываются эксперименты по длительной работе экспериментальных образцов при относительно высокой частоте повторения в режиме регулярных импульсов с достаточно высокой средней мощностью.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Достоверность работы подтверждена систематическим и последовательным развитием экспериментальной техники и методик проведения экспериментов, по мере накопления понимания исследуемых процессов, большой накопленной статистикой экспериментальных данных, хорошим совпадением результатов экспериментов с численными оценками и математическими моделями. Результаты диссертационной работы докладывались на 22 отечественных и международных конференциях.

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.

Научная новизна и практическая значимость результатов в представленной работе состоит в следующем:

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. Полученный экспериментально набор характеристик коммутаторов является уникальным для этого класса устройств.

С фундаментальной точки зрения результаты работы имеют значение как для физики газового разряда, так и для физики самоограниченных лазеров. Оригинальное сочетание вторичной электронной и фото эмиссии, приводящее к сверхбыстрой коммутации тока делает заметный вклад в физическую электронику. Результаты работы обеспечивают обширный материал для моделирования такого типа разряда.

Практическое применение результатов заключается в непосредственном внедрении данных устройств. Кроме того, возможно использование генераторов встречных пучков для поперечной накачки газовых лазеров.

Вместе с тем, по содержанию диссертации необходимо сделать следующие вопросы и замечания:

1) Почему в коммутаторе использовался только гелий или смесь гелия с водородом?

2) Описанный в главе 2 коаксиальный коммутатор мог использоваться одновременно и как активный элемент. При переходе к планарной геометрии в работе возможность такого совмещённого использования уже не рассматривается. Чем это вызвано?

3) Несмотря на то, что главной задачей диссертации являлась разработка коммутаторов для систем накачки лазеров на парах меди, в тексте работы неоднократно упоминается термин «лазеры на самоограниченных переходах атомов», что очевидно указывает на потенциал применения данных коммутаторов для накачки других лазерных сред. Рассматривались ли другие активные среды на самоограниченных переходах? Например, УФ азотный лазер или неон на линиях 540.1 или 614.3?

Также в работе присутствуют опечатки и ошибки в оформлении диссертации, например: Стр. 73 – написано «дрейфового пространство», а нужно «дрейфового пространства»; Стр. 92 – описание рисунка дано значительно раньше появления самого рисунка в тексте; Рисунок 3.3 упоминается в тексте на странице 74 и по содержанию относится к разделу 3.1.1, в то время как сам рисунок расположен уже в разделе 3.1.2 на странице 76. Несколько отличающиеся стандарты рисунков (размеры шрифтов, положение подписей осей), например, 2.4, 2.8, 2.9, 3.7

Однако сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. 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 и техническом уровне и представляет собой законченное научное исследование, содержащее решение актуальной проблемы физической электроники, что 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 искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук



Чуркин Дмитрий Сергеевич

«08» ноября 2023 г.

Дмитрий Сергеевич Чуркин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории импульсных газоразрядных лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, дом 15Б

Телефон: (383) 330-62-14, e-mail: churkin@laser.nsc.ru

Подпись Чуркина Д.С. удостоверяю,

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН

к.ф.-м.н.



Покасов Павел Викторович

08.11.23