

На правах рукописи



Гугин Павел Павлович

**Исследование коммутационных
характеристик открытого разряда,
генерирующего встречные электронные
пучки**

1.3.5 — Физическая электроника

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Бохан Петр Артемович,**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Василяк Леонид Михайлович,**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, профессор,
Чуркин Дмитрий Сергеевич,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник, федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук,

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 8 декабря 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.115.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 634055, г.Томск-55, пр. Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте <https://www.hcei.tsc.ru/ru/cat/dissertations/dissertations.html>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Озур Г.Е.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов являются одними из наиболее эффективных и качественных источников когерентного излучения видимого спектра. Это определяет основные области их применения в медицине, прецизионной микрообработке материалов, неразрушающем контроле, дистанционном лазерном зондировании атмосферы и других.

До сих пор существует нерешенный вопрос о том, что практически полученные в эксперименте эффективность генерации относительно вложенной в активную среду энергии накачки и погонная мощность излучения на порядок уступают предсказанным теоретически. Одной из причин является то, что при характерном для этих лазеров импульсно-периодическом режиме работы в разрядном канале активного элемента накапливается высокая концентрация электронов, которые, медленно разогреваясь на фронте импульса напряжения, существенно заселяют нижние рабочие уровни атомов, что сокращает доступную степень инверсии населённостей.

Для решения этой проблемы было предложено возбуждать активную среду импульсами напряжения с фронтом длительностью порядка 1 нс для того, чтобы как можно быстрее разогреть эти электроны до энергии, при которой более эффективно идёт заселение резонансного уровня.

Препятствием на этом пути стало отсутствие высоковольтных коммутаторов, которые могли бы удовлетворить одновременно всем требованиям активной среды лазеров: малое время коммутации (~ 1 нс), частота следования импульсов (десятки кГц), амплитуда тока (сотни А), напряжение (десятки кВ). Поэтому потребовалась разработка нового класса высоковольтных коммутаторов, с помощью которых можно было бы эффективно генерировать импульсы с нужными характеристиками.

В качестве основы для такого устройства было предложено использовать особый тип аномального тлеющего разряда – открытый разряд. Ранее он использовался для генерации интенсивных пучков убегающих электронов с эффективностью близкой к 100 %, и было высказано предположение, что его можно применить в качестве мощного высоковольтного обострителя напряжения наносекундного диапазона.

В данной работе предлагается использование открытого разряда в режиме генерации встречно распространяющихся интенсивных пучков электронов. Изучение этого режима функционирования открытого разряда делает перспективным его использование не только в генераторах накачки лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов, но и для решения других научно-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.

Целью работы является экспериментальное исследование коммутационных свойств открытого разряда с генерацией встречных электронных пучков (ОРВЭП), разработка на этой основе субнаносекундных коммутационных устройств и принципов их применения на примере накачки активной среды газовых лазеров импульсами с фронтом нарастания порядка 1 нс.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать и исследовать устройства для реализации открытого разряда с генерацией встречных электронных пучков.
2. Исследовать свойства открытого разряда при генерации интенсивных встречно распространяющихся электронных пучков.
3. Исследовать возможность субнаносекундной коммутации мощности в открытом разряде и идентифицировать механизмы, лежащие в ее основе.
4. Определить предельно достижимые коммутационные характеристики устройств на основе данного принципа в зависимости от условий (конструктив, параметры рабочей среды, рабочее напряжение, характеристики цепи).

Научная новизна:

1. Исследован режим генерации интенсивных встречных электронных пучков в открытом разряде, получен и исследован режим осцилляций электронов пучка внутри апертуры ячейки, обеспечивающий значительное увеличение ВУФ-подсветки по сравнению с открытым разрядом без встречных электронных пучков.

2. Впервые открытый разряд с генерацией встречных электронных пучков применён для коммутации мощности в различные типы нагрузок с характерным временем нарастания напряжения на них 0,1 – 3 нс и эффективностью > 90%. Экспериментально показана применимость такого типа разряда для построения мощных высоковольтных быстродействующих коммутаторов на его основе.

3. Определены основные механизмы, обеспечивающие высокие коммутационные характеристики структур на основе открытого разряда с генерацией встречных электронных пучков.

4. Экспериментально определены предельные режимы функционирования структур на основе открытого разряда с генерацией встречных электронных пучков в качестве коммутационных устройств.

5. Разработаны основы применения данного типа коммутационных устройств в генераторах высоковольтных сильноточных импульсов нано- и субнаносекундной длительности для широкого круга задач.

Практическая значимость работы определяется тем, что научные положения и сделанные на основе проведённых исследований выводы расширяют понимание физических принципов функционирования открытого разряда и открывают перспективные направления его практического применения, в том числе внедрение нового класса высоковольтных сильноточных эффек-

тивных коммутаторов субнаносекундного диапазона, функционирующих на частотах повторения импульсов в десятки кГц, а также открывают новые возможности для исследования физики лазеров на самоограниченных переходах атомов и ионов и других устройств сильноточной электроники. Исследования, представленные в диссертации, были поддержаны грантами РФФИ, в том числе для молодых учёных («Мой первый грант»), грантами РНФ, а также стипендией Президента Российской Федерации молодым учёным и аспирантам.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается систематическим и последовательным развитием экспериментальной техники и техники проведения экспериментов по мере накопления понимания исследуемых процессов, большой накопленной статистикой экспериментальных данных, согласием результатов экспериментов с численными оценками и математическими моделями. Кроме того, достигнута высокая повторяемость характеристик устройств, разработанных на основе полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. В открытом разряде с генерацией встречных электронных пучков скорость нарастания тока возрастает по крайней мере на порядок по сравнению с классическим открытым разрядом за счёт увеличения вклада энергии в рабочий газ благодаря многократным осцилляциям электронов пучка между ускорительными зазорами.

2. В режиме коммутации тока в открытом разряде с генерацией встречных электронных пучков реализуемы условия, когда электроны, ускоренные в одном зазоре, достигают противоположного катода с энергией более 200 эВ, достаточной для осуществления вторичной электрон-электронной эмиссии, которая становится доминирующим эмиссионным процессом при субнаносекундных временах развития разряда.

3. В открытом разряде с генерацией встречных электронных пучков совокупность фотоэмиссии в начальной фазе и вторичной электрон-электронной эмиссии в фазе коммутации приводит к эффективности вклада энергии свыше 90 % в различные типы нагрузки в диапазоне напряжений 5–100 кВ и давлении рабочего газа (гелия) 4–120 Торр при характерной длительности фронта напряжения на нагрузке менее 1 нс.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Симпозиуме «Лазеры на парах металлов» (ЛПМ 2010, 2012, 2014, Сочи), International Conference XIV Khariton's Topical Scientific Readings «Nigh-Power Pulsed Electrophysics» (2012, Сапов), International congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (2012, 2014, 2016, 2018, Томск), International Conference Atomic and Molecular Pulsed Lasers (AMPL 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 Томск), Gas Discharge Plasmas and Their Applications (GDP 2015, 2017, 2019 Томск, Новосибирск), IVESC-

ICEE-ICSTPEA-BDO-2014 (International Vacuum Electron Sources Conference; International Conference on Emission Electronics; International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications, Beam Dynamics and Optimization) (2014, Санкт-Петербург), XXIV Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (2016, 2018, Новороссийск), 5th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics and Photonics (2016, Атланта), XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (2017, Новосибирск), 70th Annual Gaseous Electronics Conference (2017, Питсбург), XIV международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2018, Новосибирск), X Всероссийская Конференция по Физической Электронике (2018, Махачкала).

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в разработке и создании экспериментальных установок, планировании, подготовке, проведении экспериментов, обработке и обсуждении их результатов, подготовке публикаций с соавторами, приведённых в списке работ автора.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 24 печатных изданиях, из которых 20 изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, обсуждается научная проблематика и мотивация проведения исследований по теме работы, формулируется цель, ставятся задачи, определены научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** даётся краткая справка на основе литературных источников о лазерах на самоограниченных переходах атомов металлов и проблеме формирования импульсов для их оптимальной накачки, которая стала одной из причин замедления развития этого класса лазеров: сильная зависимость генерационных характеристик лазера от частоты следования импульсов вследствие значительного накопления предимпульсной концентрации электронов. Это делает невозможным достижение высоких погонных мощностей путём увеличения частоты следования импульсов. Одним из способов преодоления данного затруднения является формирование импульсов накачки с длительностью фронта нарастания напряжения на уровне 1 нс. Формулируются требования к форме импульса возбуждения и устройству, способному сформировать требуемый импульс. На основании этих требований проводится анализ современной элементной базы, применяющейся в генераторах накачки данных лазеров. Показано, что основное требование на длительность фронта одновременно с высокими частотой следования импульсов и эффективностью существующая техника обеспечить не способна.

Делается предположение о возможности использования для создания коммутационного устройства с необходимым набором характеристик открытого разряда (ОР). Данный тип разряда, являющийся особой формой аномального тлеющего разряда, ранее применялся в основном для эффективной генерации интенсивных электронных пучков (ЭП) кэВ диапазона энергий, в том числе для накачки ими активных сред лазеров.

Вторая глава посвящена исследованию возможности увеличения скорости нарастания тока электронного пучка путём реализации режима генерации встречных пучков, а также построения на этой основе субнаносекундного коммутатора, работающего с активной нагрузкой. Материалы Главы опубликованы в работах [1, 3 – 6, 11, 12] из списка работ автора.

В первом разделе приводятся сведения о методике подготовки экспериментальных ячеек. Она заключается в вакуумировании при повышенных относительно планируемых рабочих температурах устройства с последующим электрокондиционированием разрядом постоянного тока при прокачке гелия. Критерием для окончания процесса является стабилизация тока разряда. Последний этап—тренировка импульсным разрядом при медленном повышении амплитуды питающего напряжения. Эта методика позволила получить высокую воспроизводимость результатов для всех исследованных в данной диссертации устройств. Кроме того, в этом разделе описывается методика измерений параметров импульсов и подготовки датчиков.

Во втором разделе описывается реализация режима встречных электронных пучков (ВЭП) в ОР. Целью эксперимента было достижение мультикилоамперных токов ЭП в широкоапертурном ОР при наносекундной длительности генерации самого пучка. Применялся коаксиальный тип кюветы, то есть катод и анодная сетка имели цилиндрическую форму и были расположены соосно. (Рисунок 1). Характеристики разряда в такой геометрии при низком напряжении близки к характеристикам классического ОР, и механизмы развития тока ЭП, таким образом, могут быть получены из механизмов классического ОР.

Конструкция ячейки показана на Рисунке 1. Она состоит из катода 1, выполненного из реакционно спечённого карбида кремния (SiSiC) внутренним диаметром $D_{in} = 50$ мм, анодной сетки 2 из молибденовой проволоки диаметром 80 мкм с шагом 1 мм и коэффициентом геометрической прозрачности $\mu = 0,85$ и малоиндуктивным выводом 5, стеклянного изолятора 3, дрейфового пространства 4. Ячейка имела штуцеры подключения к газовакуумной системе 6 и кварцевые окна 7.

В эксперименте получена амплитуда тока ЭП до $I_a = 26$ кА и плотность тока катода $j \approx 135$ А/см² при амплитуде приложенного напряжения $U_a \approx 12$ кВ и длительности импульсов тока на полувысоте $\tau_{hw} \approx 40$ нс. Дальнейшее увеличение U_a было ограничено искрообразованием при переполюсовке напряжения. Достигнутая импульсная мощность ЭП при длительной работе (часы) составила $P_{pulse} \approx 250$ МВт (при энергии ЭП $W_{eb} \approx 5$ Дж).

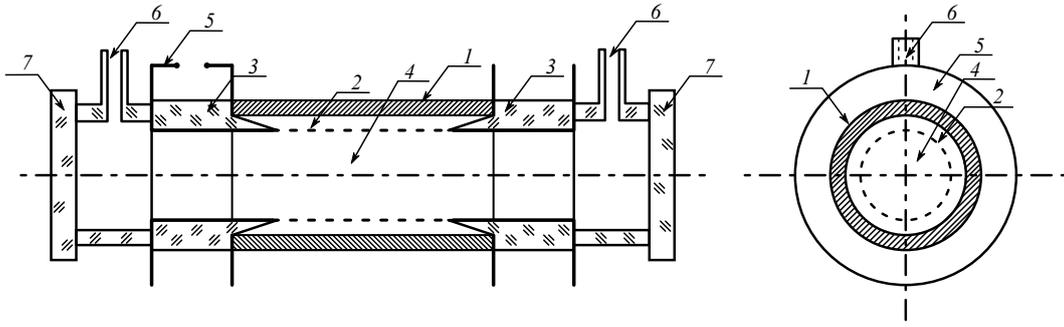


Рис. 1 — Конструкция коаксиальной ячейки

В данной работе речь идёт только об импульсном разряде, поэтому использованы «импульсные» вольт-амперные характеристики (ВАХ), содержащие амплитудное значение зарядного напряжения на ячейке U_a и амплитуду тока ЭП I_a . При $p_{He} = 9 - 20$ Торр во всём диапазоне напряжений импульсные ВАХ имеют монотонно возрастающий характер. Приблизённо плотность тока подчиняется зависимости

$$j = Ap^y U^x. \quad (1)$$

Величины A и x в Таблице 1 приведены для двух случаев: когда U — амплитудное напряжение, j — плотность тока в его максимуме; когда U, j взяты в момент максимума тока. Разница в коэффициентах в уравнении (1) вызвана тем, что в момент пика тока действующее напряжение меньше амплитудного из-за частичного разряда C_p к этому моменту.

Таблица 1 — Параметры A и x в уравнении (1)

U — амплитудное напряжение, j — плотность тока в его максимуме		
U , кВ	A	x
2,8 — 4	$2,51 \cdot 10^{-14}$	4,12
4 — 6	$2,63 \cdot 10^{-9}$	2,66
6 — 10	$3,52 \cdot 10^{-6}$	1,9
U, j взяты в момент максимума тока		
2,6 — 6	$2,1 \cdot 10^{-12}$	3,7

Характерной особенностью ВАХ является независимость $j(p)$ от давления на отдельных участках, что обеспечивается преобладанием фотоэмиссии и осцилляцией быстрых электронов внутри рабочей камеры до их полного торможения. В частности, в условиях данного эксперимента ($U_a = 10$ кВ, $p_{He} = 15$ Торр) электроны до полного торможения совершают до 5 колебаний между встречными ускорительными зазорами. В отличие от классического ОР, они не только продолжают производить фотоны с равномерной интенсивностью, но и происходит их накопление, что ещё сильнее увеличивает

подсветку, позволяет достигать той же плотности тока, что и в классическом планарном ОР за значительно меньшее время.

В третьем разделе описываются ключевые эксперименты по коммутации мощности устройствами на основе ОРВЭП. Эти устройства выполнены аналогично генератору пучка из предыдущего раздела. Первая ячейка: диаметр катода $D_{in} = 50$ мм, длина $l_g = 20$ мм и прозрачность сетки $\mu = 0,9$. Вторая ячейка: $D_{in} = 28$ мм, $l_g = 20$ мм, $\mu = 0,95$ соответственно. В схему экспериментальной установки было добавлено сопротивление нагрузки R_L в разрядный контур кюветы ОР.

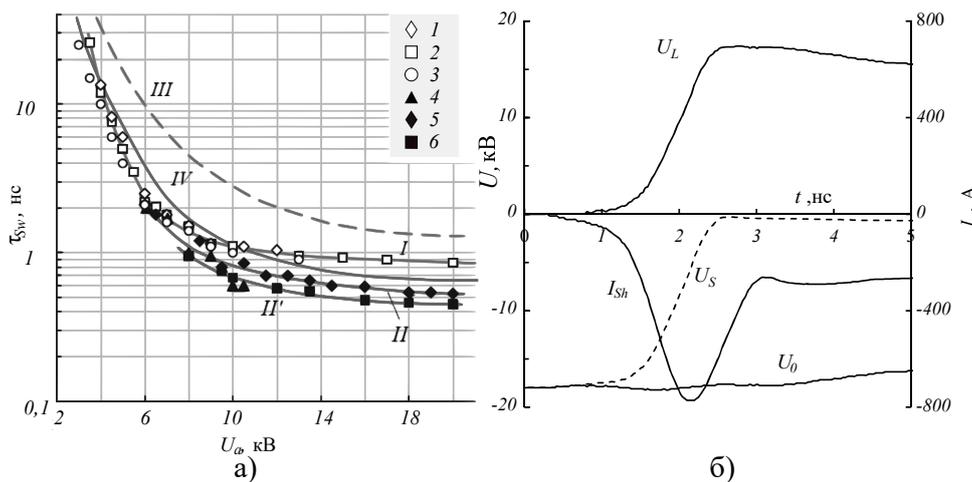


Рис. 2 — а) $\tau_{sw}(U_a)$ для ячейки с $D_{in} = 28$ мм (кривые I, II, II') и $D_{in} = 50$ мм (кривые III, IV) $He(1-3)$, $He + H_2(4-6)$; $p_{He} : 7(1), 9,7(2), 14(3), 8(III)$ Торр, $p_{He} + p_{H_2} = 9,5 + 0,85(4), 9,5 + 0,4(5), 4 + 0,4(6), 6 + 0,3(IV)$ Торр; б) Характерные осциллограммы напряжений U_0 на C_p , U_S на катоде ячейки, $U_L = U_0 - U_S$ и тока I_{sh} при $p_{He} = 6$ Торр, $R_L = 50$ Ом $D_{in} = 28$ мм

Коммутационные характеристики ячеек показаны на Рисунке 2 (а). При амплитуде напряжения $U_a > 12$ кВ в чистом гелии и $U_a > 8$ кВ в смеси гелия и водорода в ячейке с $D_{in} = 28$ мм $\tau_{sw} < 1$ нс (сброс напряжения U_S по уровням $0,9 - 0,1 U_a$). Увеличение давления примеси водорода ещё более сокращает τ_{sw} . Минимальное достигнутое $\tau_{sw} \approx 0,7$ нс для ячейки с $D_{in} = 28$ мм и $\tau_{sw} \approx 0,9$ нс для ячейки с $D_{in} = 50$ мм, а для $U_a = 20$ кВ оно уменьшается соответственно до $0,43$ и $0,65$ нс

При амплитудном напряжении на рабочей ёмкости $U_a > 18$ кВ (Рисунок 2 (б)) в первые $8-10$ нс остаточное напряжение на ключе за вычетом падения напряжения на шунте составляет $U_S = 250 - 300$ В. Далее оно увеличивается до $U_S \sim 1$ кВ. Таким образом, эффективность коммутации (2) на начальном этапе может достигнуть $\eta = 0,98$, снижаясь в дальнейшем до $\eta \sim 0,93-0,95$, но не опускается ниже $\eta = 0,9$ по крайней мере пока $U > 0,5U_a$, где

$$\eta = (U_a - U_S)/U_a. \quad (2)$$

Третья глава посвящена исследованию коммутации в планарных устройствах на основе ОРВЭП. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей на коммутационные характеристики таких устройств. На основе экспериментальных данных предложена оценочная модель развития ОРВЭП и быстрой коммутации на его основе. Материалы Главы опубликованы в работах [2,3, 8,10–21, 23,24] из списка работ автора.

В первом разделе приводятся коммутационные характеристики планарных устройств с дрейфовым пространством (ДП) (Рисунок 3 (а)) и без него (Рисунок 3 (б)).

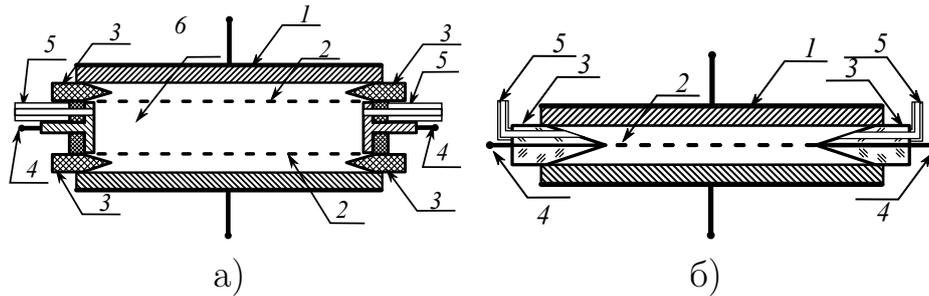


Рис. 3 — Конструкция планарных ячеек с ДП (а) и без него (б): 1 – катод, 2 – сетка, 3 – изолятор, 4 – малоиндуктивный вывод сетки, 5 – штуцеры газовакуумной системы, 6 – дрейфовое пространство.

Экспериментально продемонстрировано, что в обеих конструкциях характеристики разряда соответствуют таковым для коаксиальной геометрии, то есть можно утверждать, что в данном случае реализуется ОРВЭП. Ячейка без ДП демонстрирует значительно более высокие коммутационные характеристики, чем остальные рассмотренные конструкции (Рисунок 4 (а)).

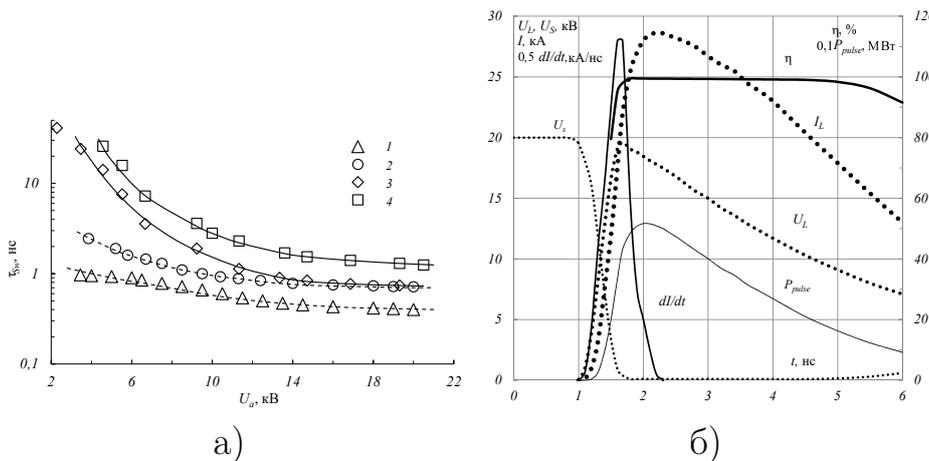


Рис. 4 — а) $\tau_{sw}(U_a)$: планарная без ДП (1); планарная с ДП (2); коаксиальная конструкция (3,4) ($p_{He} = 6(1,2), 8(4), p_{He+H_2} = 6 + 0,3$ Торр(3)); б) Осциллограммы U_S — напряжения на ячейке, U_L — на нагрузке $R_L = 0,5$ Ом, тока I_L и зависимости $dI/dt, \eta(t), P_{pulse}(t)$.

На Рисунке 4 (б) приведены осциллограммы работы ячейки без ДП и рассчитанные по ним характеристики. Минимальное регистрируемое $\tau_{Sw} = 400$ пс при нагрузке $R_L = 2$ Ом. Максимальная усреднённая по времени коммутации скорость роста тока при $U_a = 20$ кВ на нагрузке $R_L = 0,5$ Ом составила $dI/dt = 3,7 \cdot 10^{13}$ А/с, а величина коммутируемого тока $I = 28$ кА при $\tau_{Sw} = 0,5$ нс и импульсной мощности $P_{pulse} = 500$ МВт.

Осциллограммы напряжения на катодах обоих устройств, характеризуется быстрым спадом до остаточной величины $U_S = 100$ В за время, практически равное τ_{Sw} . В течение 5–10 нс U_S остаётся на этом уровне, а затем возрастает за 2–3 нс до уровня ≈ 1 кВ. Эффективность коммутации составляет $\eta = 0,99$ в первые 5–10 нс и затем постепенно уменьшается. Однако вплоть до величины $U_L \approx 0,5U_a$ она превышает 0,9.

Для наглядного сравнения коммутационных свойств ОР и ОРВЭП был проведён следующий эксперимент. Были взяты две кюветы с ДП и без него, причём ячейка с ДП могла быть включена в режиме ОР путём гальванического соединения обеих сеток и второго катода. Прочие условия, такие как $p_{He} = 14$ Торр, $R_L = 68\Omega$, $U = 8$ кВ были идентичны для всех ячеек. На Рисунке 5 а) – в) показаны осциллограммы коммутации в ОР, ОРВЭП с ДП 9 мм и ОРВЭП без ДП соответственно.

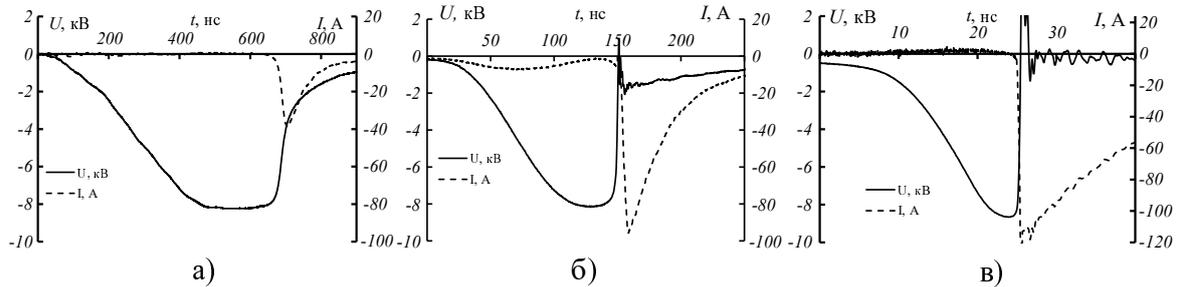


Рис. 5 — Осциллограммы коммутации в а)ОР, б) ОРВЭП с ДП 9мм, в) ОРВЭП без ДП в одинаковых условиях

Планарные и коаксиальные ячейки отличаются двумя важными параметрами: а) прозрачностью сетки, соответственно 98 и 90 %; б) соотношением Θ между суммарной длиной ускорительных зазоров $2h$ и расстоянием между катодами. Для ячейки без ДП $\Theta = 1$, для ячейки с ДП $\Theta = 0,43$ и для коаксиальной с $D_{in} = 50$ мм $\Theta = 0,12$.

Высокая прозрачность сетки и величина $\Theta = 1$ приводят к тому, что основная часть энергии ускоренного электрона выделяется в ускорительных зазорах, приводя к интенсивной ионизации. Ионы дрейфуют в сильном поле и в результате резонансной перезарядки приводят к появлению большого числа быстрых атомов, которые, сталкиваясь с атомами тепловой энергией, передают им часть импульса и одновременно возбуждают его. С одинаковой вероятностью возбуждается и налетающий атом. Вследствие эффекта Доплера излучение быстрых атомов без реабсорбции достигает катода, вы-

зывая эмиссию новых электронов. Процесс развивается экспоненциально, и зазор переходит в высокопроводящее состояние.

Эмитированный из катода электрон в процессе ускорения теряет энергию Δw равную:

$$\Delta w_e = \int_0^h \rho(w_e(x)) dx, \quad (3)$$

где $\rho(w_e)$ — энергетические потери быстрого электрона при движении в материальной среде. В условиях близких к проведённым экспериментам ($U_a = 10$ кВ, $p_{He} = 6$ Торр), при торможении электрона в процессе осцилляций между УЗ и потерь на сетке, электрон произведёт $N_i = 113$ ионов или $N'_i = 11,6$ иона/нс при почти равномерном их распределении во времени и пространстве между катодами. В свою очередь ионы, дрейфуя к катоду, в результате резонансной перезарядки образуют $N_f = 66$ быстрых атомов со средней энергией $\bar{w}_a = 150$ эВ. Скорость эмиссии электронов под действием ВУФ-излучения от быстрых атомов составит $dn_e/dt = 4,5$ электрона/нс, что даёт время коммутации $\tau_{sw} = \ln 9/n'_e = 0,49$ нс, которое близко к измеренному в эксперименте $\tau_{sw} \approx 0,6$ нс для этих условий (Рисунок 4 (а)).

Быстрая коммутация и сброс напряжения с УЗ прекращают осцилляции электрона, но не означают остановку генерации фотонов. Время торможения быстрых атомов (до энергии $\bar{w}_a \approx 50$ эВ) $\tau_{br} \approx 10$ нс. В этот период эмитируется больше электронов, чем потребляет электрическая цепь. Кроме того, во время фазы коммутации поле в зазоре может спадать быстрее, чем электрон теряет свою энергию. Амплитуда осцилляций электрона начинает увеличиваться, и он сталкивается с катодом, вызывая вторичную электрон-электронную эмиссию. Поэтому напряжение на коммутаторе падает до практически нерегистрируемой величины и остаётся таковым, в зависимости от R_L , в течение $\sim 5 - 10$ нс (Рисунок 4 (б)). Затем напряжение на зазоре возрастает и устанавливается на таком уровне, при котором генерируется достаточное количество фотонов для поддержания соответствующего тока в цепи.

Во втором разделе исследуется влияние конструкционных и экспериментальных параметров на коммутационные характеристики устройств на основе ОРВЭП. Все исследования выполнены с пересечениями отдельных параметров, что даёт возможность более тщательного сравнения и анализа результатов.

При $p_{He} = 56$ Торр достигнута величина амплитуды тока разряда $I_a = 2,25$ кА, которая ограничивалась индуктивностью разрядного контура, при плотности тока с поверхности катода $j = 1,12$ кА/см². Скорость нарастания плотности тока превышала $(dj/dt)_a \geq 3 \cdot 10^{12}$ А/с·см². Показано, что $I_a \propto p_{He}^{1,5}$. Соответствующим образом растёт и параметр dI/dt , с которым напрямую связана скорость коммутации τ_{sw} . В диапазоне $U_a = 6 - 9$ кВ наблюдается

зависимость $\tau_{Sw} \propto p_{He}^{1,5}$. Степень обострения $S = \tau_d/\tau_{Sw}$ меняется слабо и составляет $S \approx 20$, где τ_d – задержка развития разряда от начала приложения напряжения по уровню $0,1U_a$ до начала τ_{Sw} .

Влияние анодной сетки на процесс коммутации было продемонстрировано в двух экспериментах. В первом эксперименте сравнивались две одинаковые ячейки с сетками с прозрачностью 52 и 93 %. Установлено, что менее прозрачная сетка существенно ухудшает коммутационные характеристики, приближая условия к классическому ОР. Повышение давления рабочего газа до некоторой степени компенсирует это влияние, но при этом снижаются частотные характеристики.

Целью второго эксперимента являлось достижение $U_a = 100$ кВ. Обнаружено существование области давлений рабочего газа, в которой наблюдается немонотонная зависимость задержки времени пробоя от приложенного напряжения $\tau_d(U_a)$. При $p_{He} < 6$ Торр с увеличением U_a величина τ_d монотонно растёт, а затем резко уменьшается. При $U_a < 50$ кВ τ_{Sw} для одинаковых U_a меньше для больших p_{He} . В отличие от ранее полученных результатов для коаксиальных и планарных ячеек, для которых τ_{Sw} с ростом напряжения уменьшается, в рассматриваемом случае зависимость $\tau_{Sw}(U_a)$ для $p_{He} > 6$ Торр является немонотонной функцией, и только при напряжениях $U_a > 50$ кВ для всех давлений газа τ_{Sw} монотонно уменьшается с ростом напряжения, достигая $\tau_{Sw} \approx 1$ нс (по уровню 0,1–0,9). При анализе экспериментальных данных показано, что даже при высокой прозрачности анодной сетки могут существовать экспериментальные условия, в которых потери энергии ЭП на ней могут в значительной мере влиять на временные и коммутационные характеристики устройств на основе ОРВЭП, приводя к выраженной конкуренции элементарных процессов в начальной стадии развития ОРВЭП.

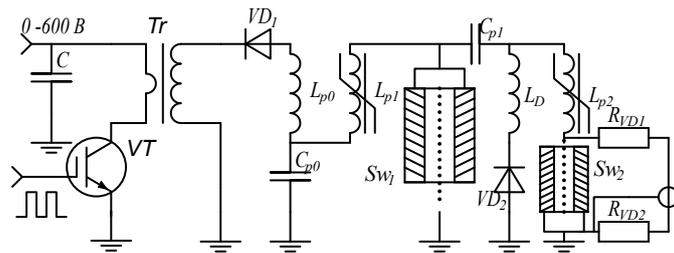


Рис. 6 — Схема двухступенчатого компрессора]

Благодаря использованию различных материалов (*Ti*, реакционно спечённый карбид кремния *SiSiC*, высокопроницаемая керамика на основе *BaTiO₃*, алюминиево магниевая бронза (БрАМг)) в качестве катодов в одинаковых ячейках, показано влияние вторичной электрон-электронной эмиссии (ВЭЭЭ) на развитие процесса коммутации, так как коэффициент ВЭЭЭ γ_e для них отличается в несколько раз.

Наилучшие $\tau_{Sw} \sim 100$ пс были получены при работе в схеме двухступенчатого компрессора импульсов (Рисунок 6), в первой ступени которого использовалась ячейка с $p_{He} = 3 - 10$ Торр, а во второй с $p_{He} = 50 - 120$ Торр

и высоким γ_e . Суммарная степень компрессии S в данном эксперименте равна произведению $S_1 \times S_2$. Максимальная достигнутая $S > 500$.

В третьем разделе рассмотрено формирование пробоя и определены предельные достижимые времена коммутации. Особенностью данной работы было то, что развитие разряда было прослежено с порога его зажигания при минимальном напряжении и до предела τ_{Sw} , определяемого реактивными характеристиками кюветы.

Последовательно выделены стадии формирования ОРВЭП, приводящие к субнаносекундной коммутации, от зажигания при $U_a = 1,5$ кВ до формирования мощных СВЧ колебаний на фронте коммутации, которые увеличением давления и напряжения подавляются. В результате достигнут фронт $\tau_{Sw} \sim 80$ пс. На основе этого сделана оценка о технической возможности достижения $\tau_{Sw} \sim 34$ пс путём усовершенствования конструкции ячейки и подбора материалов.

В четвёртом разделе были исследованы ячейки ОРВЭП с прозрачным катодом (сетчатым и со щелью) для определения ширины линий излучения гелия с резонансных уровней при больших доплеровских уширениях, вызванных движением ускоренных частиц при высокой приведенной напряженности поля. Показано, что для линии $\lambda = 501,57$ нм (переход $3^1P_1 - 2^1S_0$) при $E/N \approx 10^{-13}$ В·см² уширение линии достигло $\Delta\lambda \approx 15$ Å. Это подтверждает наличие быстрых частиц с энергией $w \sim eU_a$, излучение которых может достичь катода без реабсорбции, что косвенно подтверждает предложенную модель развития ОРВЭП.

В четвёртой главе приведено описание трёх экспериментов по практическому применению устройств на основе ОРВЭП. Материалы Главы опубликованы в работах [7, 9, 22] из списка работ автора.

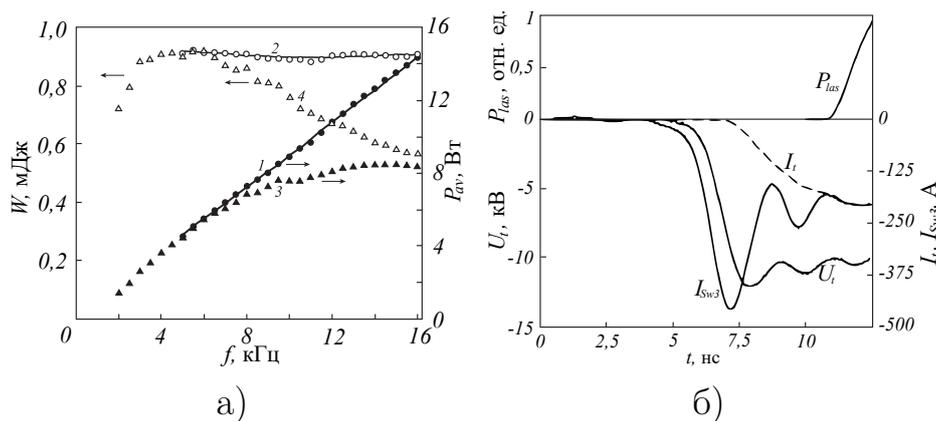


Рис. 7 — а) Частотно-энергетические характеристики лазерной генерации при различных формах импульса накачки; б) Осциллограммы импульсов напряжения на ЛПМ U_t , токов через него I_t и через ячейку ОРВЭП I_{Sw3} , генерации P_{las}

В первом разделе описан эксперимент, в котором ячейка на основе ОРВЭП включалась в состав генератора импульсов возбуждения лазера на парах меди (ЛПМ). Сравнивались частотно-энергетические характеристики

ЛПМ при накачке импульсами с фронтом длительностью 25 нс и порядка 1 нс. На Рисунке 7 (а) показаны характеристики ЛПМ при возбуждении такими импульсами: кривые 3, 4 — традиционная схема накачки с фронтом 25 нс, 1, 2 — возбуждение импульсами, как на Рисунке 7 (б) с использованием в схеме устройства на основе ОРВЭП. Видно, при возбуждении импульсом с коротким фронтом энергия в импульсе генерации сохраняется по крайней мере до $f = 16$ кГц, которая была ограничена использованным первичным генератором.

Во втором разделе описываются эксперименты по исследованию длительной работы устройств на основе ОРВЭП в режиме регулярных импульсов.

В первом эксперименте использовалась ячейка, предназначенная для накачки ЭП лазера на парах талия. Длина катода из $SiSiC$ $l_c = 50$ см, $D_{in} = 50$ мм, УЗ $h = 1,5$ мм. Обострительная ёмкость $C_p = 12$ нФ. Рабочее напряжение достигало $U_a = 10$ кВ, а ток пучка — $I_{Sh} = 7$ кА при длительности на полувысоте $\tau_{hw} = 23 - 25$ нс. Давление неона было $p_{Ne} < 15$ Торр, добавлялся водород с парциальным давлением $p_{H_2} < 1$ Торр. ЧСИ влияла только на время задержки развития пробоя τ_d . В то же время характеристики ЭП, генерируемого в данном эксперименте в диапазоне $f = 1 - 5$ кГц оставались постоянными.

Целью второго эксперимента была проверка работоспособности устройств на основе ОРВЭП как на омическую, так и ёмкостную нагрузку при повышенной средней мощности в режиме регулярных импульсов. Экспериментальная установка содержала первичный транзисторный генератор и две ступени с устройствами на основе ОРВЭП. В первой использовалось устройство с ДП длиной 10 мм, во второй такое же устройство, но без ДП. В первой ступени была смесь из $p_{He} = 5,5$ Торр и $p_{H_2} = 0,1$ Торр. Во второй ячейке — $p_{He} = 20$ Торр, $p_{H_2} = 0,3$ Торр.

Вторая ступень была нагружена на резистивную нагрузку номиналом $R_L = 20$ Ом. Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность работы двухступенчатого компрессора, состоящего из устройств на основе ОРВЭП в режиме регулярных импульсов с суммарной компрессионной фронтальной площадью импульса $S > 100$ при частоте следования импульсов до $f = 12$ кГц и напряжении до $U_a = 25$ кВ. Суммарная наработка составила более 100 часов для каждой ступени. Признаков деградации катодов и сеток не выявлено.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Обнаружено увеличение скорости нарастания тока открытого разряда при реализации в нём встречно распространяющихся электронных пучков. Определены механизмы, отвечающие за это увеличение по сравнению с классическим открытым разрядом: лучший перехват ВУФ подсветки катодом и осцилляции электронов пучка между встречными ускорительными зазорами.

2. Разработаны различные конструкции, реализующие ОРВЭП: коаксиальная, планарная с дрейфовым пространством, планарная без дрейфового пространства. Обнаружено значительное влияние конструкции ячейки на ее коммутационные характеристики.

3. Обнаружен механизм эмиссии в режиме коммутации: вторичная электрон-электронная эмиссия. При коэффициенте вторичной электрон-электронной эмиссии >1 этот механизм становится доминирующим и повышает скорость нарастания плотности тока пучка и коммутации в несколько раз по сравнению с фотоэлектронной эмиссией.

4. Впервые экспериментально показано, что при применении коммутатора на основе открытого разряда с генерацией встречных электронных пучков в цепи возбуждения лазера на парах меди длительность фронта импульса накачки составляет $\sim 1,5$ нс, что позволяет обеспечить сохранение энергии импульса излучения до частоты, по крайней мере, 16 кГц, тогда как без данного звена эта энергия начинает уменьшаться уже при 6–8 кГц.

5. Разработан генератор встречных электронных пучков с импульсным током 26 кА, импульсной мощностью 250 МВт и эффективностью генерации электронного пучка > 90 % при напряжении 12 кВ.

6. В режиме коммутации на активной нагрузке достигнуты: импульсная мощность 500 МВт, скорость нарастания тока $3,7 \cdot 10^{13}$ А/с, плотность тока эмиссии катода > 1 кА/см², эффективность коммутации 98 % в первые 5 нс при общей эффективности не хуже 90 % при работе на активную нагрузку.

7. Показана возможность работы с любым типом нагрузок, что позволило разработать двухступенчатый компрессор импульсов на основе открытого разряда со встречными электронными пучками с общей компрессией фронта импульса $S > 500$ при времени коммутации на второй ступени < 100 пс.

8. Показана возможность функционирования открытого разряда в диапазонах отдельно достижимых параметров: напряжение от 1,5 до 100 кВ, давление гелия от 2 до 120 Торр, частота следования от одиночных импульсов до 100 кГц в пакетном режиме и до 12 кГц в регулярном, джиттер при частоте $f > 1$ кГц менее 200 пс.

Публикации автора по теме диссертации

1. Bokhan P.A., Zakrevsky D.E., Gugin P.P. Generation of high-current electron beam in a wide-aperture open discharge // *Physics of Plasmas*. – 2011. – Т. 18, № 10. – С. 103112.

2. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. Коммутация высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом нарастания с обострителем на основе открытого разряда // *Письма в Журнал технической физики*. – 2012. – Т. 38, № 8. – С. 63.

3. Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E.: Generation of high-voltage pulses with subnanosecond front rise times in open discharge // *Physics of Plasmas*. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 033507.
4. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А., Казарян М.А., Лябин Н.А.: Влияние уменьшения длительности фронта импульса напряжения на частоту следования импульсов генерации лазера на парах меди // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43, № 8. – С. 715–719.
5. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.: Коммутация импульсов мощностью 500 MW с субнаносекундным фронтом нарастания на основе открытого разряда // *Письма в Журнал технической физики*. – 2013. – Т. 39, № 17. – С. 44–52.
6. Гугин П.П. Применение тиратрона тп1-10к/50 в частотном режиме для накачки газовых лазеров // *Приборы и техника эксперимента*. – 2013. – № 3. – С. 85–89.
7. Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E.: Study of the switching rate of gas-discharge devices based on the open discharge with counter-propagating electron beams // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Т. 22, № 6. – С. 063513.
8. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Генерация высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом нарастания в ”открытом разряде“. I. Конструкции и результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85, № 10. – С. 50–57.
9. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Генерация высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом нарастания в ”открытом разряде“. II Механизм коммутации // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85, № 10. – С. 58–63.
10. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Сверхвысокочастотные колебания и минимальное время коммутации кивотрона // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2015. – Т. 58, № 9–3. – С. 70–74.
11. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Исследование частотных и коммутационных характеристик планарных обострителей на основе открытого разряда со встречными электронными пучками // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2015. – Т. 58, № 9–2. – С. 75–78.
12. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Развитие разряда и минимальное время коммутации в кивотроне // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42, № 7, С. 73–80.
13. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Влияние давления рабочего газа на скорость коммутации кивотрона // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42, № 9. – С. 16–24.

14. Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E.: On the mechanism of the picosecond switching phenomenon in devices based on the open discharge with counter-propagating electron beams // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2016. – Т. 49, № 24. – С. 245202.
15. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М. А.: Коммутация 100 кВ импульсов в планарном "открытом" разряде с генерацией встречных электронных пучков. // *Письма в Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 43, № 20. – С. 37–45.
16. Schweigert I.V., Alexandrov A.L., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Bokhan P.A., Zakrevsky D.E.: Picosecond Breakdown in High-Voltage Open Pulse Discharge With Enhanced Secondary Electron Emission // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2017. – Т. 45, № 12. – С. 3202–3208.
17. Alexandrov A.L., Schweigert I.V., Zakrevskiy D.E., Bokhan P.A., Gugin P., Lavrukhin M.: Subnanosecond breakdown development in high-voltage pulse discharge: Effect of secondary electron emission // *AIP Conference Proceedings*. Т. 1893. – 2017. – С. 030041.
18. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.: Генерирование высоковольтных импульсов с пикосекундным фронтом при каскадном включении кивотронов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2018. – № 4. – С. 31–35.
19. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.: Двухступенчатый субнаносекундный плазменный коммутатор // *14th International Scientific-Technical Conference APEIE*. Т. 2. – 2018. – С. 103–107.
20. Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Schweigert I.V., Alexandrov A.L., Zakrevsky D.E.: Limit characteristics of switches based on planar open discharge // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2018. – Т. 51, № 40. – С. 404002.
21. Bokhan P.A., Gugin P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E., Schweigert I.V., Alexandrov A.L. Investigation of the characteristics and mechanism of subnanosecond switching of a new type of plasma switches. I. Devices with counter-propagating electron beams–kivotrons // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2020. – Т. 29. – №. 8. – С. 084002.
22. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.: Газоразрядный коммутатор : Патент Российской федерации № 2497224 от 27.10.2013
23. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.: Плазменный коммутатор : Патент Российской федерации № 2528015 от 10.09.2014
24. Bokhan P A., Gugi, P.P., Lavrukhin M.A., Zakrevsky D.E., Schweigert I.V., Alexandrov A.L.: Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases, Volume 1: Techniques and Measurements / под ред. Tarasenko. V. F. – Nova Science Publishers, Inc., 2016. – Гл. Switches based on the open discharge with counter-propagating electron beams. С. 221–264.