

На правах рукописи



Кайканов Марат Исламбекович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО
ПУЧКА В ДИОДЕ С ВЫСОКИМ ИМПЕДАНСОМ**

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в лаборатории №1 Института физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (ФГБОУ ВПО НИ ТПУ)

Научный руководитель: **Ремнев Геннадий Ефимович**
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:** **Усов Юрий Петрович**
доктор технических наук,
профессор кафедры электрических сетей и
электротехники ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

Бурачевский Юрий Александрович
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Томский университет систем
управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

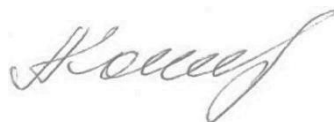
Ведущая организация: Институт электрофизики Уральского отделения
Российской академии наук, г. Екатеринбург

Защита состоится “17” декабря 2013 г. в 16³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 55.

Автореферат разослан “15” ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических
наук



А.В. Кожевников

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Импульсные электронные пучки находят широкое применение во многих областях науки и техники: возбуждение эксимерных лазеров, ионизация молекул газа и жидкостей для инициации химических процессов, обработка поверхности твердосплавных изделий, технологии электронно-стимулированного обеззараживания и стерилизации материалов, сшивка полимеров и т.д. При этом актуальным является применение потока ускоренных электронов для обработки промышленно-бытовых сточных вод, поскольку технологии предотвращения и ликвидации загрязнения окружающей среды входят в перечень критических технологий Российской Федерации. Основным параметром, определяющим эффективность использования технологии обработки водных растворов на базе импульсных электронных ускорителей, является величина плотности энергии выведенного электронного пучка. Диссертационная работа посвящена исследованию генерации импульсного электронного пучка в диоде с высоким импедансом с целью определения факторов, влияющих на эффективность вывода импульсного электронного пучка из диодной камеры высокоимпедансного ускорителя. В качестве практического использования полученных результатов по повышению плотности энергии выведенного импульсного электронного пучка показана возможность его применения для деструкции фенола, растворенного в воде.

Наибольшее распространение в схемах импульсных ускорителей с субмикро- и микросекундной длительностью напряжения получили диоды с «холодным» взрывоэмиссионным катодом. Величина тока диода с взрывоэмиссионным катодом, работающего в режиме ограничения объемным зарядом, пропорциональна величине ускоряющего напряжения в степени $3/2$ и определяется первеансом диода: $j(t) = P(t) \cdot U(t)^{3/2}$, где $j(t)$ - плотность электронного тока, $U(t)$ - напряжение, приложенное к ускоряющему промежутку, $P(t)$ – первеанс диода. Аналитическая зависимость, с высокой точностью описывающей поведение тока электронного диода с взрывоэмиссионным катодом от ускоряющего напряжения, зависит от параметров диодной системы. Геометрия диода высокоимпедансных ускорителей отлична от геометрии модели Чайлда-Ленгмюра, используемой при решении уравнения Пуассона и нахождении аналитического выражения закона «степени $3/2$ » для диодов наиболее распространенных типов импульсных ускорителей. Для совпадения экспериментальных значений первеанса диода с теоретическим расчетом по модели Чайлда-Ленгмюра обычно вводятся поправочный коэффициент – форм-фактор. При этом значение форм-факторов - величина не постоянная и зависит от отношения катод-анодного зазора к радиусу катода (для симметричных круглых катодов). Т.е. для каждого конкретного значения ускоряющего промежутка d_{AK} необходимо определять величину форм-фактора. Таким образом, актуальным является исследование работы диода с взрывоэмиссионным катодом высокоимпедансного ускорителя с целью определения аналитической

зависимости тока пучка от развиваемого ускоряющего напряжения. Исследования основных закономерностей генерации импульсного электронного пучка также необходимы для определения факторов, влияющих на эффективность вывода пучка электронов из диодной камеры через анодную фольгу в зону обработки.

Цель работы: определить основные закономерности формирования импульсного электронного пучка в диоде с высоким импедансом и установить возможность использования импульсного электронного пучка с повышенной импульсной мощностью поглощенной дозы для деструкции водного раствора фенола. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Определить аналитическую зависимость, описывающую поведение тока импульсного электронного пучка наносекундной длительности, генерируемого высокоимпедансным диодом, от развиваемого ускоряющего напряжения.
- Определить влияние эмиссионной способности взрывоэмиссионного катода высокоимпедансного диода на плотность энергии выведенного из диодной камеры импульсного электронного пучка.
- Выявить основные закономерности деструкции водного раствора фенола импульсным электронным пучком с гигаваттной импульсной мощностью.

Научная новизна работы

1. Получено аналитическое выражение, описывающее поведение первеанса импульсного электронного пучка для высокоимпедансного ускорителя.

2. Показано, что для импульсного электронного ускорителя, имеющего высокий выходной импеданс (более 100 Ом), повышение плотности энергии выведенного электронного пучка возможно за счет уменьшения эмиссионной способности взрывоэмиссионного катода, в том числе, при увеличении количества запусков.

3. Получено, что снижение плазмообразования на периферии катода при генерации электронного пучка, приводит к повышению плотности энергии выведенного импульсного электронного пучка.

4. Установлено, что при генерации электронного пучка МД-катодом лезвийной конструкции при геометрии диода $d_{AK}/r > 1$ разброс выходных параметров ускорителя, таких как ускоряющее напряжение, энергия выведенного электронного пучка импульсного электронного ускорителя, составляет менее 8% при работе на частоте 50 имп./с в течение более 10^5 включений.

5. Показано, что повышенная импульсная мощность поглощенной дозы электронного пучка – 10 ГГр/с – не оказывает ингибирующего действия на деструкцию растворенного в воде фенола, что характерно для непрерывного электронного излучения.

Научная и практическая значимость работы

Предложенная методика определения зависимости тока электронного пучка от развиваемого на диоде ускоряющего напряжения позволяет определить аналитическую зависимость первеанса диода с высоким импедансом. Результаты исследования факторов, влияющих на плотность энергии выведенного импульсного электронного пучка, генерируемого ускорителем с высоким выходным импедансом, могут быть использованы при разработке технологических схем обработки водных растворов на базе импульсных электронных ускорителей. Используемый в исследованиях источник электронов не содержит формирующих линий и искровых коммутаторов, что позволяет существенно упростить конструкцию ускорителя и повысить надежность комплекса в целом.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитическая формула, описывающая поведение тока импульсного электронного пучка в зависимости от развиваемого ускоряющего напряжения при геометрии диода $d_{AK}/r > 1$, где d_{AK} и $2r$ – величина ускоряющего промежутка и диаметр катода, соответственно.
2. Экспериментальное подтверждение повышения плотности энергии выведенного электронного пучка длительностью до 10^{-7} с за счет повышения кинетической энергии электронов при снижении эмиссионных свойств катода.
3. Ограничение плазмообразования на периферии катода при генерации электронного пучка в диоде высокоимпедансного ускорителя, схема которого основана на передаче энергии в диод через повышающий трансформатор, приводит к повышению плотности энергии выведенного электронного пучка, при этом полная энергия электронного пучка снижается.
4. Повышенная импульсная мощность поглощенной дозы импульсного электронного пучка до 10 ГГр/с не оказывает ингибирующего действия на электронно-стимулированную деструкцию водного раствора фенола.

Личный вклад автора состоит в постановке задач, планировании и проведении экспериментов по теме диссертации. Обсуждение методов решения поставленных задач проводилось с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах. Исследование влияния эмиссионных свойств катода на эффективность вывода электронного пучка, а также первеанса диода проведены лично автором. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы по работе.

Апробация работы. Основные результаты обсуждались и докладывались на научном семинаре в Институте физики высоких технологий НИ ТПУ, г.Томск, а также на международных и российских конференциях: 8-ая Международная конференция «Ядерная и радиационная физика» (Алматы, Казахстан, 2011); 18th International Pulsed Power Conference Record (Chicago, USA, 2011); 19th International Conference on High-Power Particle Beams (Karlsruhe, Germany, 2012); 17th International Symposium on High Current Electronics (Tomsk, 2012); XIX Международная научно-практическая конференция студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (Томск, 2013); XXII Российская молодежная научная конференция (Екатеринбург, 2013); II Всероссийская научно-техническая конференция

молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие технологии в современной науке и технике» (Томск, 2013).

Публикации: По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 17 работ, из которых 10 статей в реферируемых журналах из перечня ВАК, в том числе 8 статей в соавторстве, 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список цитируемой литературы из 95 наименований. Работа изложена на 105 страницах, содержит 73 рисунка и 14 таблиц.

Основное содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость и основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации проводится литературный обзор работ, посвященных разработке математической модели поведения первеанса диода с взрывоэмиссионным катодом, а также описывающих результаты исследований влияния продолжительной работы взрывоэмиссионного катода на генерацию электронного пучка. Также рассмотрены конструкции катододержателя диода и цели использования в ней дополнительных элементов - экранов. На основании анализа литературы можно сделать следующие выводы: наиболее распространенный способ получения аналитического выражения поведения первеанса реальных диодов с взрывоэмиссионным катодом основан на сравнении аналитического выражения Чайлда-Ленгмюра [1], полученного для геометрии электродов в виде двух бесконечных параллельных пластин, и экспериментальных данных. Расхождения с модельным соотношением компенсируются введением поправочных коэффициентов, зависящих от величины катод-анодного зазора d_{AK} при постоянном диаметре катода $2r$. Увеличение d_{AK}/r (необходимо для высокоимпедансных ускорителей) приводит к необходимости учета «краевого эффекта» при генерации электронного пучка. Известное в литературе соотношение Ленгмюра-Блоджетт [2] позволяет повысить точность аналитического описания экспериментальных данных благодаря учету первеанса пучка, генерируемого с периферийной части плоского катода. Однако не учитывается разлет взрывоэмиссионной плазмы в соотношении Ленгмюра-Блоджетт. Таким образом, в литературе не предложены методы определения аналитического выражения первеанса пучка при $d_{AK}/r > 1$, исключающие введение поправочных коэффициентов.

В первой главе также описаны работы, посвященные радиолизу водного раствора фенола. На основании представленных в литературе данных можно заключить, что увеличение мощности поглощенной дозы непрерывного электронного пучка приводит к снижению эффективности деструкции фенола в воде. Т.е. актуальными являются исследования воздействия импульсного электронного пучка, импульсная мощность поглощенной дозы которого значительно превышает среднюю мощность непрерывного электронного потока.

Во второй главе диссертации приводится описание импульсного электронного ускорителя АСТРА-М (рис.1), диагностического оборудования, использованного в исследованиях генерации электронного пучка.

Принцип работы ускорителя АСТРА-М основан на разряде батареи емкостных накопителей C_2 (90 нФ) через автотрансформатор T_2 (1:10) непосредственно на электронный диод без промежуточных формирующих линий (рис.1). Длительность импульса напряжения порядка 450 нс (по основанию), время достижения импульсом напряжения амплитудного значения 200 нс.

Исследование первеанса диода проводилось по показаниям емкостного делителя напряжения и пояса Роговского (ПР), размещенных в генераторе. При сравнении данных, рассчитанных по показаниям ПР и цилиндра Фарадея (ЦФ) при полном поглощении электронного пучка коллектором, получено хорошее согласование экспериментальных данных. На рис.2 представлены значения первеанса, рассчитанные по показаниям ПР и ЦФ (напряжение измерялось емкостным делителем напряжения).

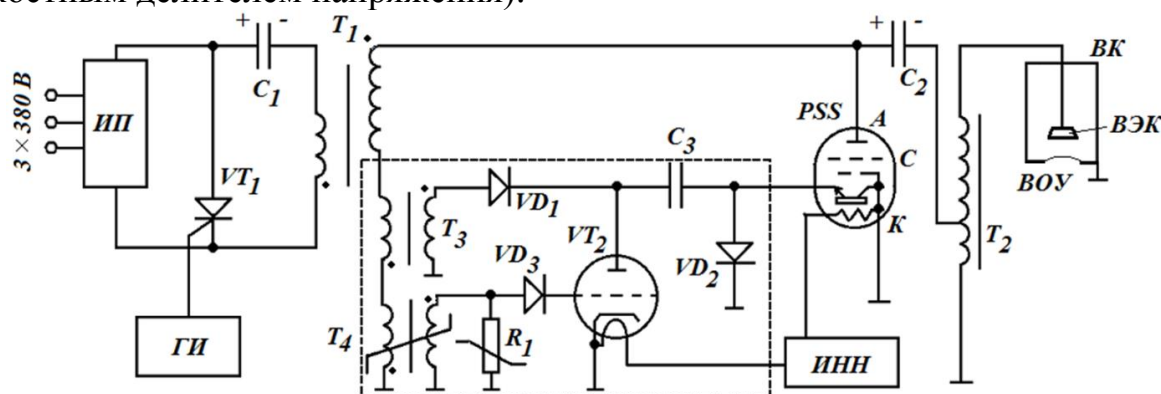


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема импульсного электронного ускорителя АСТРА-М. ИП – источник питания; ГИ – генератор импульсов; C_1 – первичный емкостной накопитель (40 мкФ); VT_1 – тиристорный коммутатор; T_1 – повышающий импульсный трансформатор (1:20); C_2 – высоковольтный емкостной накопитель (100 нФ); PSS – псевдоискровой разрядник (PseudoSpark Switcher); T_2 – высоковольтный импульсный трансформатор (1:10); T_3 – импульсный трансформатор тока; C_3 – конденсатор; VT_2 – малоомощный импульсный тириатрон с термокатодом; T_4 – пик-трансформатор; R_1 – варистор; ИНН – источник накальных напряжений; VD_1 , VD_2 , VD_3 – диоды; ВК – вакуумная камера; ВЭК – взрывозмиссионный катод; ВОУ – выводное окно ускорителя. Пунктирной линией ограничен блок запуска коммутатора PSS.

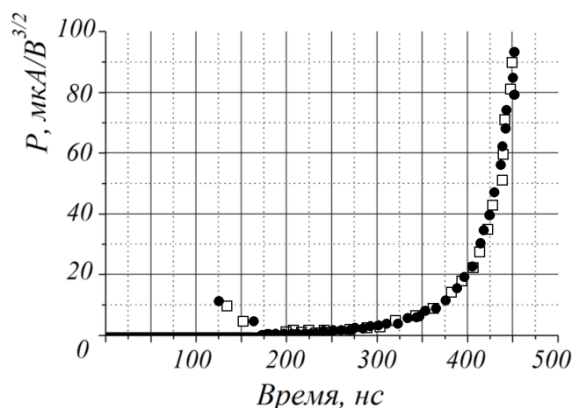


Рис. 2. Расчет первеанса диода по показаниями пояса Роговского (белые квадраты) и ЦФ (черные круги) при полном поглощении электронного тока коллектором ЦФ

Таким образом, имеющееся диагностическое оборудование позволяет корректно производить измерения параметров пучка.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования генерации импульсного электронного пучка наносекундной длительности ускорителем с высоким выходным импедансом (200- 220 Ом). При исследовании работы электронного диода с игольчатым катодом получено, что эффективность вывода электронного пучка из вакуумной камеры в атмосферу через выводное окно (титановая фольга 50 мкм) повышается при уменьшении эмиссионной способности катода. Полученный результат обусловлен увеличением импеданса диода, что приводит к росту развиваемого на электронном диоде ускоряющего напряжения, поскольку схема генератора представляет собой разряд емкости на нагрузку через повышающий трансформатор. Однако применение игольчатого катода не позволило достичь величины энергии выведенного электронного пучка более 2.7 Дж при полной энергии пучка 59 Дж, т.е. эффективность вывода электронного пучка, рассчитанная относительно энергии электронного пучка, подведенной к анода, составила 4.6%. Величина развиваемого на диоде ускоряющего напряжения при этом составила 294 кВ (300). Обеспечить снижение локальной напряженности электрического поля на поверхности катода для изменения условий образования взрывоэмиссионной плазмы предложено посредством применения лезвийной конструкции катода.

Лезвийный катод изготавливался из медной ленты толщиной 0.4 мм, длиной 290 мм и шириной 6 мм. Медь выбрана для обеспечения отвода тепла с катода. Свернутая в спираль лента крепилась к нержавеющей основе, расстояние между витками ленты 6-7 мм. Диаметр катода составил 38-40 мм. Применение лезвийной конструкции катода позволило достичь величины энергии выведенного электронного пучка 4.1 Дж, амплитуда ускоряющего напряжения при этом достигла значения 341 кВ.

Поскольку, во-первых, известно, что увеличение количества включений катода приводит к изменению его эмиссионных свойств, во-вторых, основное потенциальное применение ускорителя подразумевает использование его в частотном режиме длительное время, необходимыми являлись исследования работы электронного диода при большом количестве запусков.

В результате проведенных исследований показано, что при работе медного лезвийного катода в частотном режиме (20-30 имп./с) происходит повышение развиваемого на диоде ускоряющего напряжения в течение $(10-15) \cdot 10^3$ импульсов с 350 до 450 кВ (рис.3). Величина полной энергии электронного пучка, подводимой к аноду, вследствие рассогласования нагрузки с генератором, снижается с 60 до 45-50 Дж. Величина же энергии выведенного электронного пучка увеличивается с 4.1 до 8 Дж. Однако с дальнейшим увеличением количества запусков катода происходит увеличение разброса развиваемых выходных параметров ускорителя (рис.3). Разброс амплитудного значения ускоряющего напряжения после $2 \cdot 10^4$ запусков составил более 22% ($U_m = 470 \pm 22\%$ кВ) при начальном разбросе порядка 9%.

Увеличение разброса выходных параметров ускорителя обусловлено изменением морфологии эмитирующей поверхности катода, что приводит к изменению эмитирующей способности катода от импульса к импульсу [3]. Для повышения стабильности работы диода был изготовлен МД-катод из двусторонне-фольгированного стеклотекстолита. Геометрия МД-катода идентична геометрии медного катода.

В результате получено, что лезвийный МД-катод обладает большей стабильностью при работе длительное время. Рост амплитуды ускоряющего напряжения происходит в течение $10 \cdot 10^3$ импульсов с 350 до 450 кВ (рис.4).

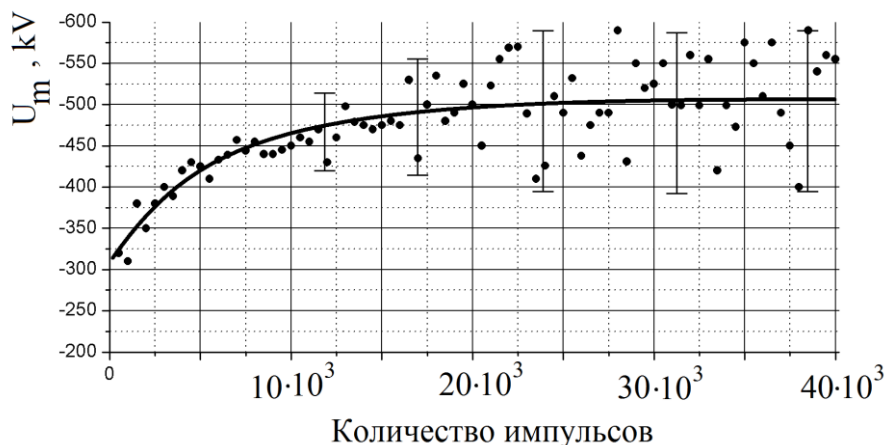


Рис. 3. Изменение амплитудного значения ускоряющего напряжения с увеличением количества включений. Катод – медный лезвийный, $d_{AK}=26$ мм, $r=19$ мм, частота следования импульсов 20-30 имп./с.

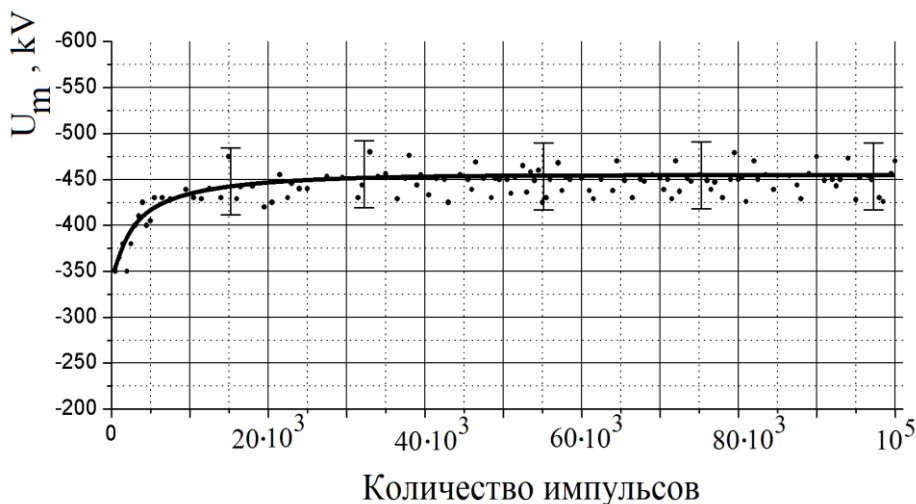


Рис. 4. Изменение амплитудного значения ускоряющего напряжения с увеличением количества запусков. МД-катод, частота следования импульсов 20-30 имп./с.

Среднее значение амплитудного значения ускоряющего напряжения сохраняется более 10^5 импульсов, при этом максимальный разброс составляет 8%.

Величина выведенной энергии электронного пучка, как и в случае с металлическим медным катодом, увеличивается с количеством запусков с 5 до 9 Дж. Таким образом, применение металлодиэлектрического катода позволяет

повысить стабильность работы диода, что объясняется отсутствием существенного влияния изменения морфологии поверхности катода на инициацию взрывной эмиссии электронов.

С целью повышения эффективности вывода электронного пучка из вакуумной камеры, были проведены исследования первеанса диода с катодом лезвийной конструкции при геометрии диода $d_{AK}/r > 1$.

Первеанс диода (коэффициент пропорциональности между током диода и развиваемым ускоряющим напряжением в степени $3/2$) многими авторами рассчитывается по соотношению Чайлда-Ленгмюра [1], поскольку геометрия диодов часто подчиняется соотношению $d_{AK}/r < 1$. С увеличением вклада краевого эффекта на генерацию электронного пучка, т.е. с ростом соотношения d_{AK}/r , происходит существенное отклонение экспериментальных значений первеанса диода от модельного соотношения Чайлда-Ленгмюра. Для того чтобы добиться совпадения экспериментальных значений первеанса с расчетными, вводятся различные поправочные коэффициенты (форм-фактор и т.п.). При этом универсальности получаемые аналитические соотношения не имеют: поправочные коэффициенты зависят от величины d_{AK}/r . В работе [4] предлагается использовать поправку в форме закона Ленгмюра-Блоджетт [2] для цилиндрических электродов, при этом не учитывается разлет эмитирующей плазмы.

Однако в каждом конкретном случае получаемые соотношения имеют свои особенности: не учитывается изменение геометрии электродов за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы, эмиссионная поверхность изменяется и не контролируется в течение длительности импульса и т.д. Таким образом, в литературе не представлены модельные соотношения первеанса диода, а, следовательно, и тока электронного пучка от величины ускоряющего напряжения, для геометрии $d_{AK}/r \sim 1$ или $d_{AK}/r > 1$.

Для определения аналитической зависимости первеанса диода, были проведены исследования работы лезвийного катода $r=19$ мм при начальных значениях катод-анодного зазора $d_0=26, 20$ и 15 мм. Основной целью являлось определение аналитической модели первеанса диода электронного ускорителя с взрывоэмиссионным катодом лезвийной конструкции в геометрии $d_{AK}/r > 1$ по моделям Чайлда-Ленгмюра и Ленгмюра-Блоджетт при учете разлета взрывоэмиссионной плазмы в течение генерации электронного пучка в обеих моделях:

$$P = P_{\text{planar}} + P_{\text{edge}} \quad (1)$$

где первеанс (в $\text{мкА/В}^{3/2}$) центральной части катода подчиняется закону Чайлда-Ленгмюра (S - площадь эмитирующей поверхности катода, изменяющаяся в течение длительности ускоряющего напряжения):

$$P_{\text{planar}} = 2.33 \times S/d^2 \quad (2)$$

а первеанс диода для краевой эмиссии электронов подчиняется соотношению:

$$P_{\text{edge}} = 14.66/8(2\pi r/d \cdot \alpha^2) \quad (3)$$

где P_{edge} в мкА/В^{3/2}, $\alpha = \ln(d_0/v_p t) - c_1 \cdot [\ln(d_0/v_p t)]^2 + c_2 \cdot [\ln(d_0/v_p t)]^3 + \dots$, (4)
 v_p – скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы, $c_1=0.4$, $c_2=0.0917$, d – эффективный катод анодный зазор $d_i = d_{0i} - v_p t$ (ранее соотношение Ленгмюра-Блоджетт использовалось без учета сокращения катод-анодного зазора и увеличения эмиссионной площади взрывоэмиссионной плазмы), r – эффективный радиус катода равный $r = r_0 + v_p t$.

При этом лезвийная конструкция ограничивает эмиссионную способность катода, что необходимо, как было указано, для сохранения сравнительно высокого импеданса диода в течение всей длительности ускоряющего напряжения. Для аналитического описания поведения тока диода были взяты в расчет первые три члена величины α (ур. 4). На основании полученных экспериментальных данных рассчитывались значения c_1 и c_2 в соотношении 4 (величина α) из системы уравнений:

$$2.33 \times S/d_1^2 + 14.66/8 \cdot [2\pi r/d_1(\alpha(c_1, c_2))]^2 = P_1 \quad (5)$$

$$2.33 \times S/d_2^2 + 14.66/8 \cdot [2\pi r/d_2(\alpha(c_1, c_2))]^2 = P_2 \quad (6)$$

где P_1, P_2 , – экспериментальные значения первеанса диода для различных начальных зазоров d_{01} и d_{02} соответственно.

В модели приняты следующие допущения:

- скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы в нормальном и аксиальном направлении одинакова и постоянна в течение всей длительности приложенного напряжения и равна $v_p = 2.6 \pm 20\%$ см/с для меди [3];

- электронный поток не является биполярным, поскольку плотность тока электронного пучка на аноде порядка 0.03 кА/см², что не вызывает образования анодной плазмы, а вклад ионизации десорбируемого с анода газа возможен только при длительности тока гораздо большей, чем в ускорителе АСТРА-М. Оценки показывают, что время, необходимое для ионизации десорбируемого с анода газа при плотности тока 0.03 кА/см² и возникновения биполярного потока составляет порядка 2500 нс;

- профиль эмитирующей поверхности катода при расширении взрывоэмиссионной плазмы обуславливает увеличение эмиссионной поверхности со временем по закону: $S(t) = (a_0 + v_p \cdot t) (b_0 + v_p \cdot t)$ где a_0 – толщина медной ленты, b_0 – длина медной ленты.

Решением системы уравнений (5)-(6) явилась пара значений $c_1=0.6$, $c_2=0.24$.

В результате получено соотношение первеанса диода:

$$P_{diode} = \frac{2.33 \cdot S(t)}{(d_0 - v_p t)^2} + \frac{11.5 \cdot r_0}{(d_0 - v_p t) \cdot \left\{ \ln \frac{d_0 - v_p t}{v_p t} - 0.6 \left(\ln \frac{d_0 - v_p t}{v_p t} \right)^2 + 0.24 \left(\ln \frac{d_0 - v_p t}{v_p t} \right)^3 \right\}^2} \quad (7)$$

Найденное соотношение с высокой точностью описывает экспериментальные значения первеанса диода (рис.5).

На рис.5 также приведены расчетные значения первеанса диода по модели Чайлда-Ленгмюра и Ленгмюра-Блоджетт (в котором не учитывается разлет взрывоэмиссионной плазмы).

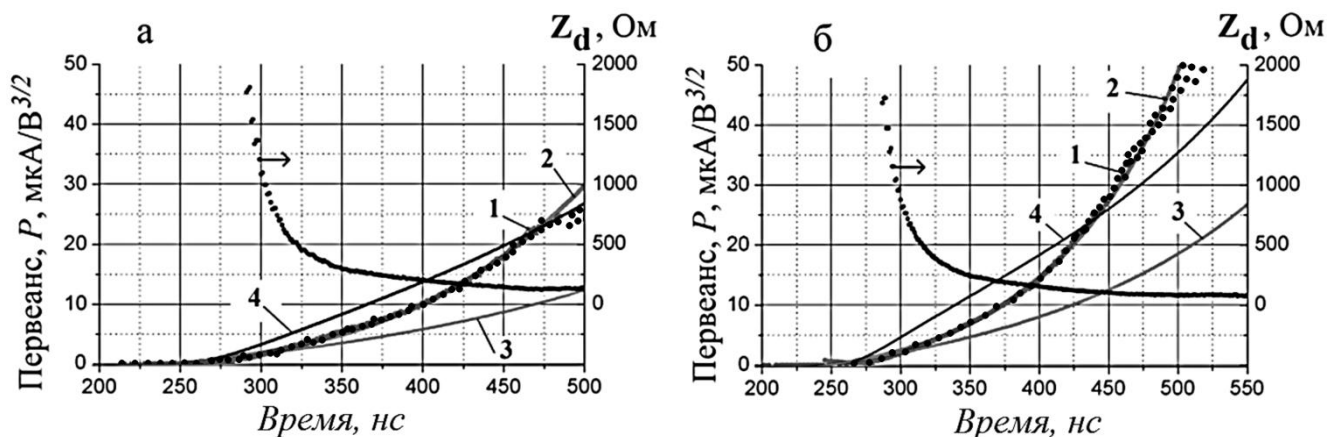


Рис. 5. Первеанс электронного диода: а- $d_0 = 26$ мм ($d_{AK}/r=1.37$), б- $d_0=20$ мм ($d_{AK}/r=1.05$). Z_d – импеданс диода, 1 (черные круги)– экспериментальное значение первеанса диода; 2 (сплошная линия) – значение первеанса диода по найденному соотношению (7); 3 -значение первеанса диода по закону Чайлда-Ленгмюра (2); 4 – расчетное значение первеанса диода с поправкой Ленгмюра-Блоджетт, не учитывающей расширение катодной плазмы

Изменение скорости расширения взрывоэмиссионной плазмы (был изготовлен идентичный по геометрии катод из свинца, $v_p=1.2\pm 15\%$ см/мкс) не повлияло на точность описания экспериментальных значений первеанса диода найденным соотношением (рис.6).

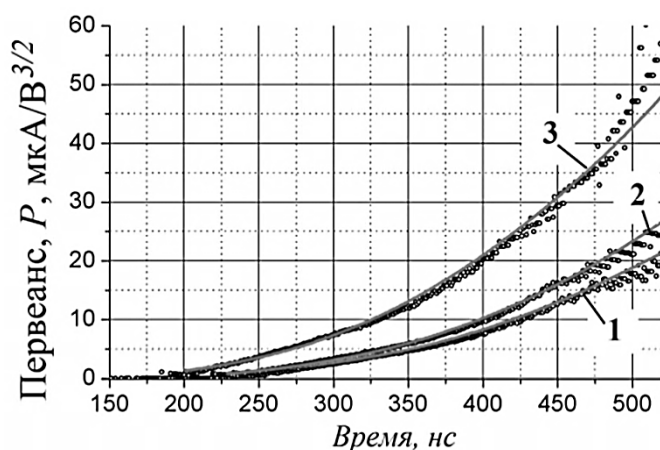


Рис. 6. Первеанс электронного диода со свинцовым катодом (точки – экспериментальные данные, сплошные линии – расчет по найденному соотношению (1)): 1- $d_0 = 26$ мм; 2 - $d_0 = 21$ мм; 3 - $d_0 = 15$ мм

Таким образом, получена математическая модель поведения первеанса диода с взрывоэмиссионным катодом, учитывающая влияние «краевого эффекта», что особенно важно для высокоимпедансных ускорителей, т.е. при геометрии диода $d_{AK} > r$. В отличие от ранее известных моделей, соотношение (7) с высокой точностью описывает поведение первеанса диода с

взрывоэмиссионным катодом как при изменении параметра v_p (скорости разлета взрывоэмиссионной плазмы), так и при изменении величины d_{AK}/r .

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследования влияния ограничения плазмообразования на периферии катода (краевого эффекта) при генерации электронного пучка на плотность энергии выведенного электронного пучка наносекундной длительности.

При исследовании первеанса диода получено, что существенную роль при генерации электронного пучка играет краевой эффект. Для снижения влияния краевого эффекта был изготовлен экран для размещения в конструкции катододержателя. Результаты моделирования распределения напряженности электрического поля в ускоряющем промежутке представлены на рис.7, где показано значение напряженности поля вдоль линии у поверхности катода. В расчете приняты значения: $U=350$ кВ, $d_{AK}=24$ мм, $r=19$ мм.

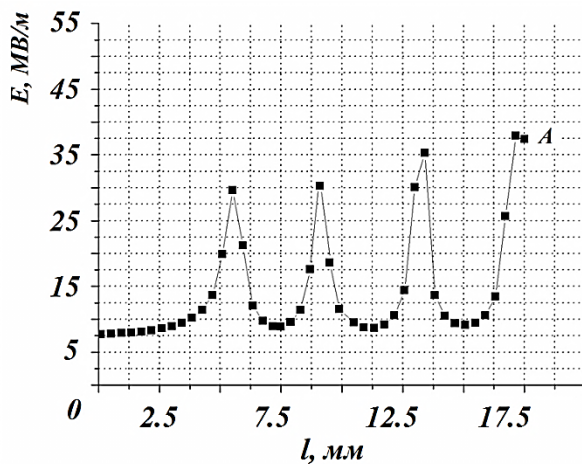


Рис. 7. Расчет напряженности электрического поля на поверхности катода ($d_{AK}=24$ мм, $U=350$ кВ, $r_k=19$ мм, 0-центр катода).

В результате изменения распределения напряженности поля у катода электронного диода удалось обеспечить снижение первеанса за счет подавления краевого эффекта. На рис. 8 представлены экспериментальные значения первеанса диода в случае отсутствия и наличия экрана в конструкции катода.

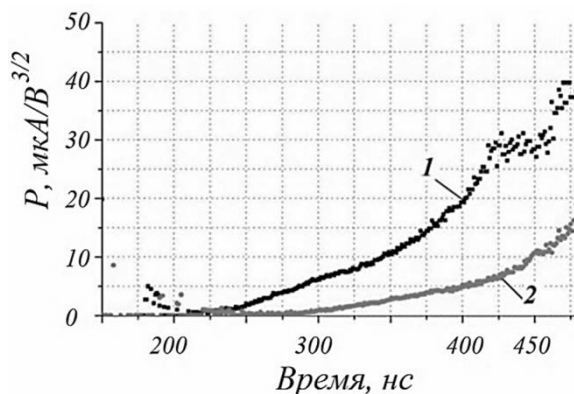


Рис. 8. Первеанс диода ($d_{AK}=24$ мм):
1- без экрана, 2- с экраном.

Снижение первеанса привело к увеличению импеданса диода, что позволило повысить величину энергии выведенного электронного пучка до 19-20 Дж (амплитудное значение развиваемого на диоде ускоряющего напряжения порядка 500 кВ), в то время как без экрана величина выведенной энергии составила 6-9 Дж (напряжение достигло значения 375 кВ). Т.е. при прочих равных параметрах (зарядное напряжение от источника питания, величина катод-анодного зазора, конструкция выводного окна ускорителя) изменение распределения напряженности электрического поля в ускоряющем промежутке обусловило 3-х кратное увеличение энергии выведенного электронного пучка. Достичь полученного результата удалось благодаря схемному исполнению генератора ускорителя, представляющему собой разряд емкостного накопителя на диод через повышающий трансформатор.

Следует отметить, что эксперименты по изменению вылета катода за экран показали, что при выдвижении экрана за плоскость катода (т.е. случай фокусировки электронного пучка) энергия выведенного электронного пучка также не превысила величину 6-9 Дж.

Таким образом, повышение эффективности вывода электронного пучка происходит не за счет фокусировки, а за счет снижения влияния краевого эффекта на генерацию импульсного электронного пучка, т.е. подавления плазмообразования на периферии катода.

Одним из потенциальных применений электронного ускорителя АСТРА-М является обработка водных растворов. Поэтому для параметров ускорителя, развиваемых при различных режимах работы (до 1000 включений МД-катода, более 20000 включений МД-катода, а также при наличии экрана в конструкции катодержателя), были рассчитаны распределения поглощенной дозы одного импульса электронного пучка по глубине слоя воды. Данные моделирования представлены на рис.9.

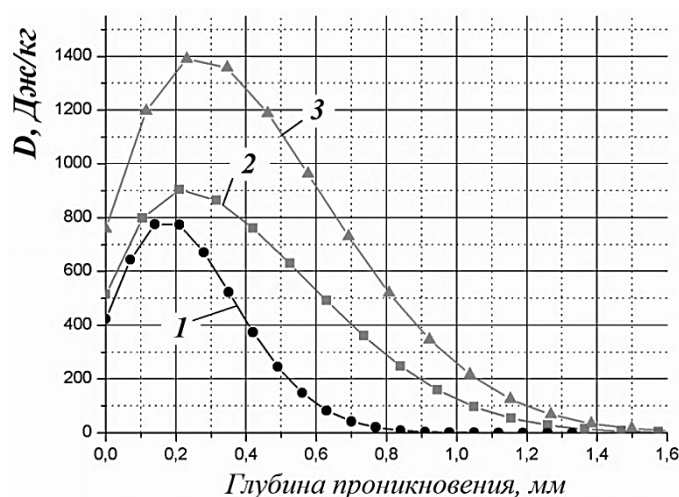


Рис. 9. Распределение поглощенной дозы одного импульса электронного пучка по глубине слоя воды (МД-катод, $r=19$ мм, $d_{AK}=26$ мм):
1 – 100-е включение;
2 – после 10000 включений;
3 – с экраном (100-е включение)

Как видно из полученных данных (рис.9), наибольшая поглощенная доза 1,5 кГр достигается при работе ускорителя с диодом разработанной конструкции.

В качестве исследуемого вещества для экспериментов по воздействию электронного пучка на водные растворы был выбран водный раствор фенола,

поскольку фенол является одним из токсичных загрязнений в промышленных сточных водах различных предприятий, т.е. практическая значимость данных исследований очевидна.

Проведенный литературный анализ показал, что воздействие непрерывного электронного пучка на водные растворы фенола характеризуется особенностью: повышение мощности поглощенной дозы приводит к снижению эффективности окисления фенола. Известно [5,6], что при мощности дозы излучения 1.1 кГр/ч РХВ составляет $G(-C_6H_5OH)=0.170$, а при 5.0 кГр/ч снижается в несколько раз до значения $G(-C_6H_5OH)=0.043$. Таким образом, необходимыми являются исследования воздействия наносекундного электронного пучка с импульсной мощностью поглощенной дозы до 10 ГГр/с (выше мощности дозы непрерывного электронного пучка в 10^5 раз).

Исходная концентрация фенола в воде составляла 200 и 80 мг/л. Результаты импульсно-пучковой обработки воды, содержащей фенол в указанных концентрациях, показаны на рис.10а. Также на рис.10б представлены линейные анаморфозы кинетических кривых деструкции фенола в воде при воздействии электронного пучка (зависимость $\ln[C_6H_5OH]$ от поглощенной дозы D).

По полученным данным рассчитана дозовая константа импульсно-пучковой деструкции фенола (k):

$$k=(\ln([C_6H_5OH])_0 - \ln([C_6H_5OH])_D)/D.$$

При исходной концентрации фенола в воде 82 мг/л - $k=0,21 \text{ кГр}^{-1}$, при исходной концентрации фенола 200 мг/л - $k=0.12 \text{ кГр}^{-1}$.

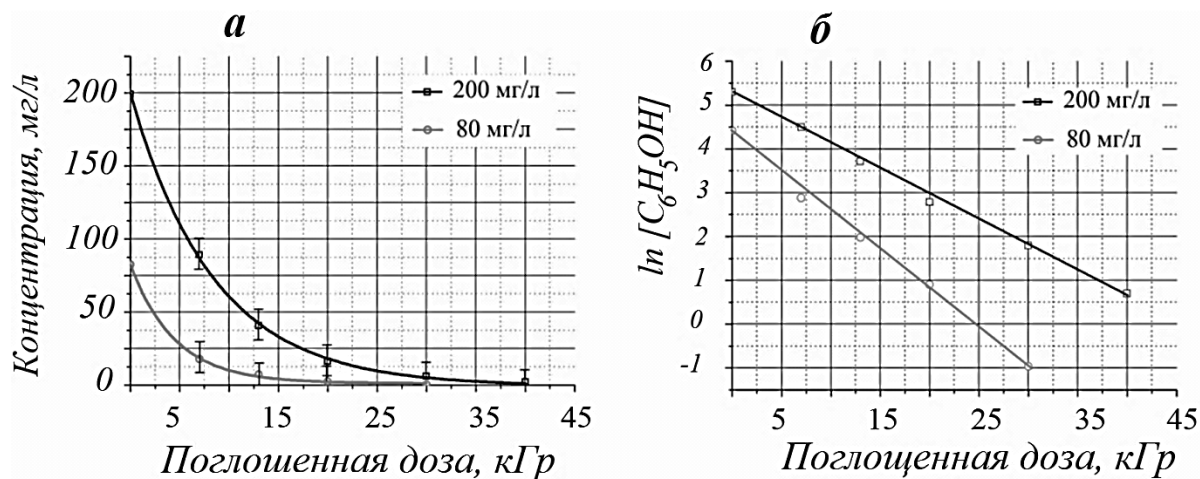


Рис. 10. Изменение концентрации фенола в воде в зависимости от поглощенной дозы электронного пучка (а) и линейные анаморфозы кинетических кривых окисления (б) при различных исходных концентрациях фенола в воде.

Таким образом, установлено, что повышенная импульсная мощность дозы электронного пучка не оказывает ингибирующего действия на электронно-стимулированную деструкцию фенола в воде.

Основные результаты работы

1. Предложена методика определения аналитической зависимости первеанса диода высокоимпедансного ускорителя от времени, на основании которой получена аналитическая модель зависимости тока диода с взрывоэмиссионным катодом от развиваемого на диоде напряжения в геометрии диода $d_{AK}/r > 1$. Полученная модель может рассматриваться как универсальная, поскольку с высокой точностью описывает экспериментальные данные и не зависит от величины катод-анодного зазора, что характерно для ранее известных моделей.
2. Исследована работа импульсного электронного ускорителя при различных типах катодов: игольчатой и лезвийной конфигурации. Показано, что снижение локальной напряженности электрического поля на кромке эмитирующей поверхности обуславливает задержку плазмообразования на катоде. В результате достигается повышение импеданса диода, что необходимо для повышения развиваемого на диоде ускоряющего напряжения.
3. При снижении эмиссионной способности катода за счет уменьшения эмитирующей площади взрывоэмиссионной плазмы происходит увеличение плотности энергии выведенного электронного пучка. При этом эффективность передачи энергии, накопленной в генераторе, в энергию импульсного электронного пучка снижается. Однако увеличение развиваемого на диоде ускоряющего напряжения обуславливает повышение энергии выведенного электронного пучка.
4. При увеличении количества включений металлического катода лезвийной конструкции происходит повышение плотности энергии выведенного электронного пучка за счет снижения эмиссионной способности катода. Однако с ростом количества включений более $\sim 12 \cdot 10^3$ включений импульсов происходит изменение эмиссионных свойств катода, что обуславливает увеличение нестабильности генерации ускоряющего напряжения диода – разброс более 22%. Повысить стабильность генерации ускоряющего напряжения позволяет разработанная конструкция МД-катода – разброс менее 8% при количестве включений более 10^5 .
5. Снижение напряженности электрического поля на периферии катода за счет электростатической экранировки обуславливает значительный рост плотности энергии выведенного электронного пучка. При этом рост плотности энергии достигается не за счет фокусировки сформированного электронного пучка, а именно за счет снижения плазмообразования на внешней кромке катода, что обуславливает снижение первеанса диода и, следовательно, повышение развиваемого на диоде ускоряющего напряжения.
6. Проведены измерения степени окисления фенола в воде при воздействии электронного пучка с высокой импульсной мощностью дозы – до 10 ГГр/с. Показано отсутствие ингибирующее действие повышенной импульсной мощности поглощенной дозы на деструкцию фенола в воде.

Основные публикации по теме диссертации

- a. Исследование первеанса диода высокоимпедансного ускорителя/ *Кайканов М.И.*// Известия вузов. Физика. – 2013.–Т.56 –№7/2. – С.379-383 (8386-2013)
- b. Исследование влияния эмиссионной способности катода на эффективность вывода импульсного электронного пучка/ *Кайканов М.И.*// Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №5; URL: <http://www.science-education.ru/111-10213>
- c. A high-repetition rate pulsed electron accelerator/ Egorov I., Esipov V., Remnev G., *Kaikanov M.*, Lukonin E., and Poloskov A.//IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. – V.20. - №4. – P.1334-1339. (импакт-фактор 1.36)
- d. Частотно-импульсный электронный ускоритель «АСТРА»/ Егоров И.С., *Кайканов М.И.*, Луконин Е.И., Ремнев Г.Е., Степанов А.В.// Приборы и техника эксперимента. –2013. – №5. – С.81-84.
- e. Исследование генерации импульсного электронного пучка в частотном режиме работы ускорителя/ Ремнев Г.Е., Егоров И.С., *Кайканов М.И.*, Канаев Г.Г., Луконин Е.И., Нашилевский А.В., Степанов А.В.// Известия вузов. Физика. – 2011. – № 11/3. – С. 74 – 80.
- f. Выходное окно сильноточного ускорителя электронов "АСТРА"/ Егоров И.С., *Кайканов М.И.*, Ремнев Г.Е.// Известия ТПУ . – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 91-94.
- g. Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом/ Вагнер М.И., Егоров И.С., *Кайканов М.И.*, Прибытков Г.А., Ремнев Г.Е., Савицкий А.П., Степанов А.В.// Известия вузов. Физика. – 2011. –Т.54. – №11/3.– С. 80 – 86.
- h. Repetitive Source of Pulsed Electron Beams/ Egorov I.S., Remnev G.E., *Kaikanov M.I.*, Lukonin E.I., Esipov V.S., Poloskov A.V., Kolokolov D.Yu.// Известия ВУЗов. Физика. – 2012. – Т.55. – №10/3. – С.58-60
- i. Патент РФ №2473436 RU, МПК C02F1/30. Способ очистки сточных вод/ Маркелов В.А., Михаленко В.А., Маслов А.С., Сярг Б.А., Попов А.В., Ремнев Г.Е., Степанов А.В., *Кайканов М.И.*, Меринова Л.Р., Егоров И.С. Заявлено 05.08.2011. Опубл. 27.01.2013, Бюл.№22
- j. Частотный импульсный электронный ускоритель для радиационных технологий/ Ремнев Г.Е., Егоров И.С., *Кайканов М.И.*, Канаев Г.Г., Луконин Е.И., Нашилевский А.В., Степанов А.В.// В кн.: Сборник докладов 8-ой международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 20-23 сентября 2011г., Алматы, Казахстан. – 2011. – С. 549-555.
- k. Study on Improving Efficiency of Phenol Aqueous Solution Oxidation using Pulsed Electron Beam/ *Kaikanov M.I.*, Remnev G.E., Merinova L.R.// Известия ВУЗов. Физика. –2012. – Т.55. – №10/3. – С.139-141.
- l. Исследование генерации импульсного сильноточного электронного пучка наносекундной длительности/ Ротарь С.В., Ермоленко Н.С., *Кайканов М.И.*// В кн.: Сборник докладов XIX Международной научно-практической

конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», 15-19 апреля 2013 г., Томск. – Т.1. – С.88-89

- m. Exit window for the Astra repetitive high-current pulsed electron accelerator/ Egorov I., *Kaikanov M.*//Proceedings of 19th International Conference on High-Power Particle Beams, September 30 - October 4, 2012, Karlsruhe, Germany – P.181
- n. Treatment of Industrial and Household Waste Water with the Pulse Electron Accelerator-Based Setup/ Egorov I.S., *Kaikanov M.I.*, Kolokolov D.Yu., Merinova L.R., Remnev G.E., Sazonov R.V., Stepanov A.V., Voyno D.A., Maslov A.S., Siarg B.A.// Известия ВУЗов. Физика. –2012. – Т.55.– №10/3.– С.61-64
- o. Effects of pulsed electron beam on chemical composition of water solution/ Merinova L.R., Shiyan L.N., *Kaikanov M.I.*, Kolokolov D.Yu.// Proceedings of 19th International Conference on High-Power Particle Beams, September 30 - October 4, 2012, Karlsruhe, Germany – P.181
- p. Очистка и стерилизация промышленно-бытовых стоков импульсным электронным пучком наносекундной длительности/ Ремнев Г.Е., Степанов А.В., Войно Д.А., Егоров И.С., *Кайканов М.И.*, Маслов А.С., Меринова Л.Р., Попов А.В., Сярг Б.А., Шиян Л.Н.// В кн.: Сборник докладов 8-ой международной конференции «Ядерная и радиационная физика», Алматы. – 2011. – С. 506-509.
- q. Импульсно-пучковое окисление органических загрязнений в воде/ Ротарь С.В., Ермоленко Н.С., Меринова Л.Р., *Кайканов М.И.*// В кн.: Сборник докладов XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современные техника и технологии», Томск, 2013. – Т.3. – С.158-159

Список цитируемой литературы:

1. I. Langmuir. The effect of space charge and residual gases on thermionic currents in high vacuum.//Physical review - 1913. – V.2 – №6. – P.450-486.
2. I. Langmuir and K.Blodgett. Currents limited by space charge between coaxial cylinders//Physical review. – 1923. – V.22. - №4. – P.347-356
3. Гунин А.В., Ландль В.Ф., Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. Взрывоэмиссионный катод с большим временем жизни для генераторов мощного СВЧ-излучения// Письма в ЖТФ. – 1999. – Т.25.– №25. – С.84-94
4. R.K.Parker, R.E. Anderson and C.V. Duncan. Plasma-induced field emission and the characteristics of high-current relativistic electron flow// Journal of Applied Physics. – 1974. – V.45. – P. 2463-2479
5. S. Seino, T. A. Yamamoto, K. Hashimoto, S. Okuda, N. Chitose, S. Ueta and K. Okitsu. Gamma-ray irradiation effect on aqueous phenol solutions dispersing TiO₂ or Al₂O₃ nanoparticles// Rev.Adv.Mater.Sci. – 2003. – № 4. – P. 70-74
6. N. Getoff. Radiation-induced degradation of water pollutants – state of art// Radiat. Phys. Chem.– 1996. – V. 47. – № 4. – P. 581-593