

На правах рукописи



Суворов Дмитрий Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО
ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена на кафедре электронной техники и технологии ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор
Коротченко Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

д-р физ-мат. наук., профессор
Степанов Владимир Анатольевич

канд. техн. наук, доцент
Верещагин Николай Михайлович

Ведущее предприятие: ОАО «Плазма», г. Рязань

Защита состоится «21» апреля 2009 г. в зале Ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.211.03 ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Ученый совет РГРТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан «___» марта 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д-р техн. наук, профессор



Б.И. Колотилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Широкое применение импульсного газового разряда в мощных лазерах, в плазменных панелях и экранах, в плазмохимических реакторах обусловлено уникальностью процессов, происходящих на стадии формирования разряда. Физика этих процессов сложна и к настоящему времени исследована недостаточно. Кардинальное улучшение рабочих характеристик плазменных приборов требует достоверных количественных данных о процессе формирования разряда. К ним, прежде всего, относятся данные о динамике электрического поля и распределения концентраций заряженных частиц в разрядном промежутке, о частотах элементарных процессов (упругих соударений, ионизации и возбуждения) и их относительном энерговкладе, о токе разряда и напряжении на промежутке. Непосредственное получение этих данных в ходе эксперимента практически невозможно, так как время формирования разряда очень мало (единицы-десятки наносекунд). Альтернативой лабораторному эксперименту является эксперимент численный – компьютерное моделирование формирования разряда.

Наиболее распространены модели формирования разряда, основанные на гидродинамическом приближении, в рамках которого учитываются ионизация электронным ударом, перемещение электронов и ионов под действием поля, ион-электронная эмиссия на катоде, влияние пространственного заряда на напряженность поля. Недостатком существующих моделей является искусственное согласование уравнений, описывающих физические процессы в разряде, с электродинамикой внешней цепи путем введения некоторой приближенной функции, отражающей изменение анодного напряжения во времени с учетом параметров электрической цепи. Необходимость такого допущения определяется неустойчивостью численного расчета по классической схеме, в которой электрическое поле вычисляется решением уравнения Пуассона. Проблема достижения самосогласования модели является основной для численного изучения формирования разряда.

Другим допущением, присутствующим в моделях, является расчет эмиссии электронов из катода под действием излучения разряда через некоторый интегральный коэффициент фотоэмиссии, значение которого варьируется в широких (10^{-4} - 10^{-6}) пределах. Более точный расчет должен, очевидно, учитывать фотоэмиссию электронов отдельно для каждой линии излучения разряда и квантовый выход материала катода для этой спектральной линии.

Таким образом, в связи с ограничениями существующих моделей, недостаточно изучено влияние на характеристики разряда таких важных параметров системы накачки, как крутизна фронта, индуктивность разрядного контура, начальная концентрация, параметры внешней цепи и других. Получение этих данных является актуальной задачей, необходимой для понимания физики формирования разряда.

В последнее время в связи с интенсивным развитием вычислительной техники разработано множество готовых программных продуктов, обеспечивающих решение специализированных научно-технических задач. Представляется актуальной разработка специализированного программного продукта для вычисления динамических характеристик разряда и определения оптимального режима формирования разряда.

Целью данной работы является создание самосогласованной модели формирования импульсного разряда и исследование с её помощью процесса формирования объемного разряда для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные физические процессы, происходящие при формировании разряда и оказывающие на него существенное влияние;
- установить причины нестабильности совместного численного расчета уравнений внешней цепи с уравнением Пуассона;
- разработать устойчивый алгоритм самосогласованного расчета перераспределения потенциала в промежутке совместно с электродинамикой внешней цепи;
- разработать алгоритм расчета фотоэмиссии с катода под действием резонансных линий собственного излучения разряда;
- определить основные параметры системы возбуждения, влияющие на процесс формирования разряда и максимально достижимую инверсию для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом;
- выполнить численное моделирование формирования разряда при различных параметрах системы накачки;
- провести физический эксперимент и сопоставить полученные данные с результатами расчета.

Научная новизна

1. Впервые при расчете формирования разряда учитывалась фотоэмиссия электронов с катода под действием отдельных линий собственного резонансного излучения разряда.

2. Впервые в численной модели для расчета перераспределения потенциала в промежутке на основе уравнения сохранения полного тока использована эквивалентная электрическая схема, представляющая собой последовательно-параллельное соединение источников тока и емкостей.

3. С помощью разработанной компьютерной модели в наносекундном диапазоне времени получены количественные данные о динамике изменения напряжения и тока разряда, концентрации электронов и ионов, распределения потенциала, фотоэлектронной и ион-электронной составляющих тока вторичной эмиссии с катода, инверсии возбуждённых молекул и энергии, вводимой в промежуток.

4. Получены зависимости напряжения, тока разряда, степени перенапряжения, энергии и времени формирования от основных параметров систе-

мы возбуждения разряда: скорости роста напряжения, обострительной емкости, индуктивности разрядного контура, начальной концентрации, состава газовой смеси, давления и межэлектродного расстояния, параметров контура накачки.

Научные положения, выносимые на защиту

1. На стадии формирования импульсного высоковольтного сильноточного разряда в условиях, соответствующих азотному лазеру с накачкой поперечным разрядом от емкостного накопителя энергии, основным вторичным процессом на катоде является фотоэмиссия под действием собственного излучения разряда и фотоэлектронная составляющая тока катода в 2 – 5 раз превышает ион-электронную.

2. С увеличением крутизны фронта импульса возбуждения в диапазоне $10^{11} - 2 \cdot 10^{13}$ В/с, рост степени перенапряжения, достигаемой в процессе развития объемного разряда замедляется. Зависимость степени перенапряжения от крутизны фронта хорошо (с погрешностью не более 10 %) аппроксимируется предложенным соотношением:

$$\Lambda = \alpha \sqrt[3]{\frac{dU}{dt}},$$

где Λ – степень перенапряжения, α – константа, зависящая от рода газа (газовой смеси), dU/dt – крутизна фронта.

3. На стадии формирования разряда скорость ввода энергии в среду существенно (в 10 – 50 раз) больше, чем на стадии горения, энергия формирования разряда составляет основную (70 – 80 %) часть энергии, запасенной в накопительной емкости, и вводится в объем при более высоком значении температуры электронов, чем на стадии горения, длительность которой поэтому целесообразно минимизировать.

4. Для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом существует оптимальная скорость нарастания напряжения на электродах (порядка $3 \cdot 10^{12}$ В/с), при которой достигается максимальная эффективность накачки (отношение максимальной инверсии уровней $S^3\Pi_u - V^3\Pi_g$ к энергии формирования разряда).

Практическая значимость

1. Разработана самосогласованная модель формирования сильноточного (амплитудой тока до 100 кА) высоковольтного (до 50 кВ) объемного разряда в газовых смесях при давлении 200 – 2000 Торр и межэлектродном расстоянии 0,4 мм – 4 см. Модель может быть использована для расчета формирования разряда в приборах плазменной электроники: импульсных газовых лазерах, плазменных экранах и коммутационных приборах.

2. На основе разработанной самосогласованной модели формирования разряда создан программный комплекс, предназначенный для расчета развития разряда в чистых газах (He, Ne, Ar, N₂, H₂, Kr, Xe) с учетом значений реактивных элементов внешней цепи.

3. Для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом получены данные об основных разрядных процессах: динамике перераспределения концентрации зарядов и потенциала в промежутке, инверсии лазерных уровней возбуждения, скорости роста составляющих тока. Установлено, что зависимость максимальной инверсии уровней $C^3P_u - B^3P_g$ от концентрации азота в смеси имеет максимум, который соответствует концентрации азота 5 – 8 % и смещается в сторону больших концентраций с увеличением амплитуды импульса напряжения.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в ОАО «РЗМКП» (г. Рязань) при повышении электрической прочности магнитоуправляемых контактов, в ООО «Импульсные технологии» при оптимизации конструкции газонаполненных разрядников, в учебном процессе РГРТУ.

Апробация работы

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, обсуждались на конференциях профессорско-преподавательского состава Рязанского радиотехнического университета (2006, 2008 гг.), на I международной научно-практической конференции «Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе» (Рязань, 2005), на VIII международной конференции «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул AMPL-2007» (Томск, 2007), на 54-м международном симпозиуме AVS (Seattle, 2007), на V всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников и источников света» (Саранск, 2007), на XIII всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» (Рязань, 2008).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 17 публикациях в том числе 6 публикаций в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения; содержит 203 страницы основного текста, иллюстрированных 97 рисунками, список литературы, включающий 97 источников на 7 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки самосогласованной и физически корректной модели формирования импульсного разряда, получения с её помощью данных о газоразрядных процессах при формировании высоковольтного сильноточного объемного разряда для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом.

В первой главе проведен обзор литературных источников по физике импульсного разряда и существующим методам его моделирования.

Рассмотрены основные процессы, протекающие при формировании импульсного газового разряда. Дан сравнительный анализ различных видов вторичной эмиссии и их влияния на процесс формирования разряда. Описаны

основные типы разрядов и условия их возникновения, основные технические приложения импульсного объемного разряда и системы его возбуждения.

Рассмотрены основные методы моделирования разряда и существующие модели объемного разряда. Проанализированы недостатки существующих моделей и причины неустойчивости численного расчета. Показана актуальность разработки полностью самосогласованной модели и исследования с её помощью влияния на характеристики разряда параметров системы возбуждения: крутизны фронта возбуждающего импульса, начальной концентрации электронов, площади электродов, параметров разрядного контура и контура накачки.

Сформулированы цели и задачи исследований работы.

Во второй главе описывается разработанная модель формирования импульсного объемного разряда. Физико-математическую основу модели составляет система уравнений непрерывности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_e}{\partial t} + \operatorname{div} \Gamma_e &= n_e \sum_{j=1}^k v_{ij} - n_e \sum_{j=1}^k \beta_j n_{pj} + \theta_{add}, \\ \frac{\partial n_{p1}}{\partial t} + \operatorname{div} \Gamma_{p1} &= v_{i1} n_e - \beta_1 n_e n_{p1}, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\partial n_{pk}}{\partial t} + \operatorname{div} \Gamma_{pk} &= v_{ik} n_e - \beta_k n_e n_{pk}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Γ_e и Γ_p – плотности потоков частиц (электронов и ионов), n_e и n_p – их концентрации, v_i – частота ионизации, β – коэффициент ион - электронной рекомбинации, θ_{add} – интенсивность начальной ионизации, k – число типов ионов в модели. Плотности потоков заряженных частиц описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= -n_e \mu_e E, \\ \Gamma_{p1} &= n_{p1} \mu_{p1} E, \\ &\dots\dots\dots \\ \Gamma_{pk} &= n_{pk} \mu_{pk} E, \end{aligned} \quad (2)$$

где μ_e и μ_p – подвижности, E – напряженность электрического поля.

Коэффициенты, входящие в гидродинамические уравнения (подвижности электронов и частоты ионизации), вычисляются решением уравнения Больцмана в двучленном приближении. Для этой цели использован свободно распространяемый программный пакет BOLSIG.

Граничными условиями для системы уравнений (1) являются выражение для плотности электронного тока с катода j_Σ :

$$j_\Sigma = e n_e(0) v_{ek} = j_{exn} + \sum_{i=1}^k \left[e \gamma_{ion}^i n_p^i \mu_p^i E_0 + \sum_{m=1}^{Z_i} \eta_m^i \frac{1}{\tau_m^i} \int_0^d g(x) n_m^{*i}(x) dx \right] \quad (3)$$

и нулевые значения концентрации заряженных частиц на электродах (электроны исчезают на аноде, а ионы – на катоде):

$$n_e(d) = 0, \quad n_p(0) = 0, \quad (4)$$

где e – заряд электрона, $n_e(0)$, v_{ek} – концентрация и скорость вторичных электронов вблизи катода, j_{exn} – плотность электронного тока под действием внешнего ионизатора, γ_{ion} – коэффициент ион - электронной эмиссии, n_p – концентрация ионов вблизи катода, μ_p – их подвижность, E_0 – напряженность поля на катоде, $g(x)$ – геометрический фактор (x – расстояние от катода), $n_m^*(x)$ – концентрация частиц газа в возбужденном состоянии m , τ_m – время жизни этого состояния, η_m – квантовый выход катода для спектральной линии, соответствующей излучательному переходу частицы из состояния m , Z – число рассматриваемых уровней частицы, излучательный переход из которых

приводит к образованию фотонов с энергией, превышающей работу выхода катода, d – расстояние между электродами.

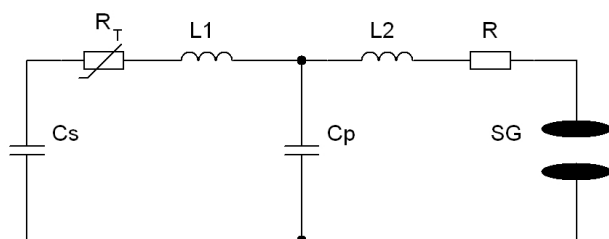


Рисунок 1 – Схема замещения системы возбуждения объемного разряда от емкостного накопителя энергии. SG – разрядный промежуток, C_s и C_p – накопительная и обострительная ёмкости, $L1$ и $L2$ – паразитные индуктивности, R_T и R – сопротивления коммутационного тиристора и контура накачки соответственно

Гидродинамические коэффициенты (частота ионизации, подвижности частиц), входящие в уравнения непрерывности (1), являются функциями от приведенной напряженности электрического поля E/p (E – напряжённость, p – давление газа). Следовательно, для самосогласованного решения задачи формирования разряда необходим расчет динамики перераспределения электрического поля

в промежутке. Поле определяется процессами во внешней цепи и накоплением зарядов внутри промежутка. Схема замещения внешней цепи определяется реальной схемой возбуждения объемного разряда. Схема замещения системы возбуждения разряда от емкостного накопителя энергии представлена на рисунке 1.

Уравнения внешней цепи записываются в соответствии со схемой замещения (рисунок 1):

$$\begin{aligned}
 U_{C_s}(t) &= I_C(t)R_T(t) + L1 \frac{dI_C(t)}{dt} + U_{C_p}(t), \\
 U_a(t) &= U_{C_p}(t) - I_D(t)R - L2 \frac{dI_D}{dt}, \\
 U_{C_p}(t) &= \frac{1}{C_p} \int (I_C(t) - I_D(t)) dt, \\
 U_{C_s}(t) &= U_{C_s}(0) - \frac{1}{C_s} \int I_C(t) dt, \\
 U_{C_s}(0) &= U_0, \quad U_{C_p}(0) = 0,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где C_s , C_p – накопительная и обострительная емкости, U_{C_s} , U_{C_p} – напряжения на накопительной и обострительной емкостях, I_C – ток через накопительную

емкость, U_a , I_D – напряжение и ток разрядного промежутка, $L1$ – суммарная индуктивность контура накачки, $L2$, R – индуктивность и сопротивление разрядного контура (паразитные), U_0 – напряжение на накопительной емкости в начальный момент времени. Сопротивление R_T определяется параметрами коммутационного тириатрона.

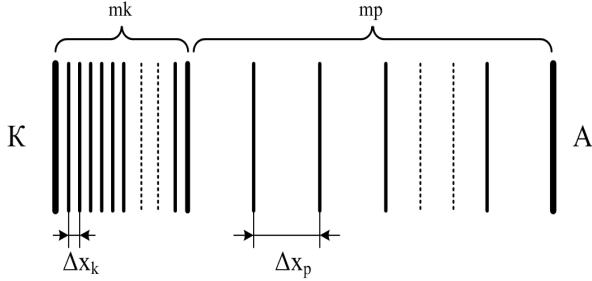


Рисунок 2 – Неоднородная расчетная сетка: mk и mp – количества элементарных слоёв прикатодной области и области плазмы

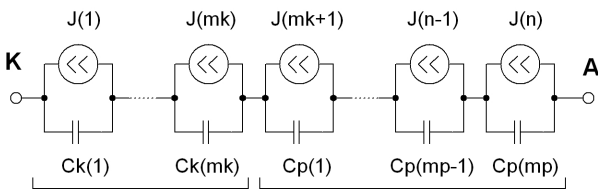


Рисунок 3 – Схема замещения разрядного промежутка: J , Ck и Cp – генераторы тока и емкости элементарных слоёв

Разрядный промежуток разбивается на две расчетных области – прикатодная область с высокими значениями напряженности поля и область плазмы (рисунок 2). Прикатодная область разбивается на mk слоев с шагом Δx_k , а область плазмы разбивается на mp слоев с шагом Δx_p .

Для расчета напряженности электрического поля внутри промежутка каждый из слоев расчетной сетки представлялся параллельным соединением источника тока и емкости (рисунок 3).

Значения виртуальных емкостей Ck и Cp рассчитываются по формуле плоского конденсатора:

$$Ck = \varepsilon_0 \frac{S}{\Delta x_k}, \quad Cp = \varepsilon_0 \frac{S}{\Delta x_p}, \quad (7)$$

где S – площадь электродов, Δx_k и Δx_p – величины пространственных шагов расчетных областей, ε_0 – электрическая постоянная.

Выбранная эквивалентная схема замещения разрядного промежутка основана на уравнении полного тока (6), согласно которому через емкости

Особенностью разработанной модели является использование уравнения сохранения полного тока для вычисления электрического поля в промежутке:

$$\frac{I_D}{S} = -e(\Gamma_e + \Gamma_p) + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (6)$$

где I_D – ток разряда, S – площадь электродов, Γ_e , Γ_p – плотности потоков электронов и ионов. Такой подход обеспечивает устойчивое и совместное самосогласованное решение уравнений непрерывности (1) и уравнений электродинамики внешней цепи (5).

В численной реализации модели уравнения и их системы (1) – (5) решаются методом конечных разностей. Адаптивный временной шаг расчета, вычисляется на основе условия КФЛ (Куранта-Фридрихса-Леви). Разряд-

проходит ток смещения, а источники тока соответствуют току переноса заряженных частиц между слоями.

В третьей главе представлены результаты моделирования импульсного объемного высоковольтного разряда для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом от емкостного накопителя энергии. Основные параметры численного эксперимента: давление газа – 760 Торр, межэлектродное расстояние – 1,2 см, состав газовой смеси – 95 % гелия и 5 % азота, величина обострительной емкости – 5 нФ, накопительной – 10 нФ, индуктивность разрядного контура – 1 нГн, контура накачки – 500 нГн, сопротивление разрядного контура (омическое) – 1 мОм, начальное напряжение накопительной емкости – 18 кВ, площадь электродов – $33,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, материал катода – медь, коэффициенты вторичной ион-электронной эмиссии для ионов гелия и азота полагались равными 0,02 и 0,05 соответственно, начальная концентрация электронов – 10^7 см^{-3} .

С помощью модели в наносекундном диапазоне времени получены количественные данные о динамике изменения напряжения и тока разряда, концентрации электронов и ионов, распределения потенциала, фотоэлектронной и ион-электронной составляющих тока катода.

Результаты моделирования выявляют следующий механизм развития разряда. На фронте импульса возбуждения разряда в объеме промежутка образуются начальные электроны. С некоторого момента времени, когда приведенная напряженность превысит определённое значение, начинается интенсивная ионизация газа электронами. Концентрации электронов и ионов резко увеличиваются, и поле в промежутке искажается пространственным зарядом. Обеднённая электронами прикатодная область повышенной напряженности поля существенно расширяется и достигает приблизительно четверти длины промежутка. В результате интенсивной ионизации за короткий (менее 20 нс) интервал времени концентрация заряженных частиц в области плазмы резко возрастает, а ток разряда увеличивается до сотен ампер. После того как он превысит ток заряда обострительной емкости (примерно через 100 нс на рисунке 4), напряжение на промежутке уменьшится. Причиной уменьшения является также падение напряжения на паразитной индуктивности разрядного контура, составляющее около 5 %

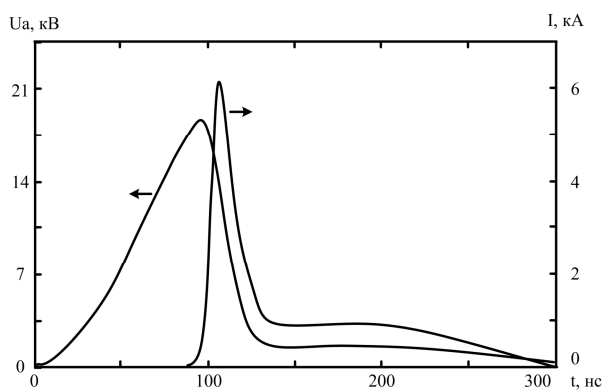


Рисунок 4 – Временные диаграммы напряжения на промежутке и тока разряда

от анодного напряжения для условий численного эксперимента.

Переход от роста напряжения к его спаду условно называют пробоем, несмотря на то, что через промежуток уже протекает значительный ток. После пробоя ток разряда продолжает увеличиваться за счет интенсивной ионизации, несмотря на снижение напряжения, достигает максимума и далее уменьшается (рисунок 4).

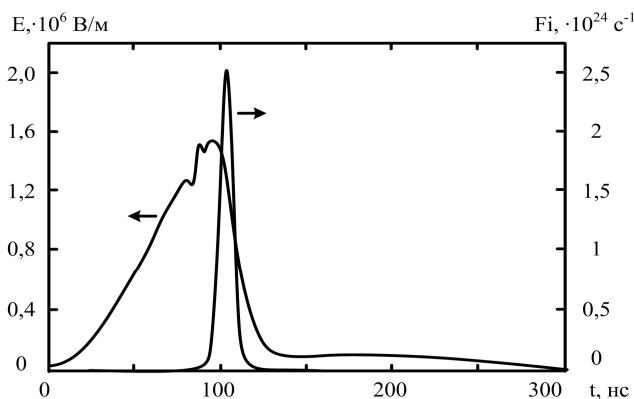


Рисунок 5 – Временная диаграмма напряженности поля в объеме промежутка и интенсивности ионизации

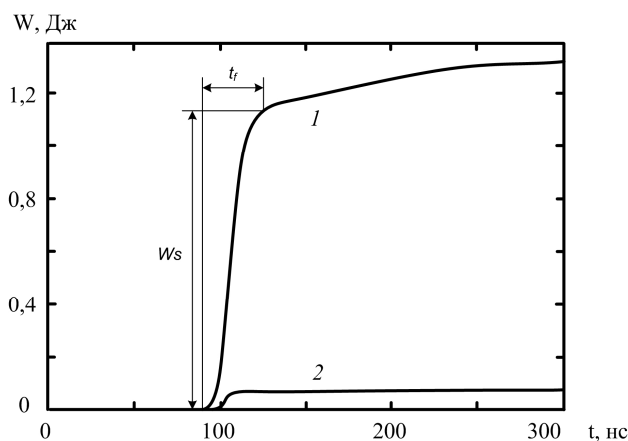


Рисунок 6 – Временная диаграмма суммарной энергии вводимой в разряд (1), и энергии, затрачиваемой на ионизацию (2)

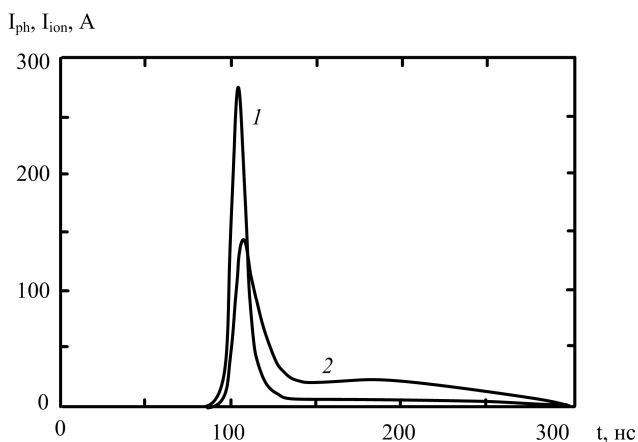


Рисунок 7 – Временная диаграмма фототока с поверхности катода (1) и тока ион-электронной эмиссии (2)

Поскольку катодное падение потенциала в данных условиях сравнительно мало (менее 1 кВ), временная зависимость напряженности поля в области плазмы (рисунок 5) в целом повторяет форму импульса напряжения на промежутке (рисунок 4). Отличием является лишь небольшой S-образный перегиб слева от максимума, соответствующий формированию катодной области потенциала. Максимум интенсивности ионизации соответствует началу спада напряжения, когда напряженность поля в промежутке достаточно высока (рисунок 5).

Временная зависимость энергии, введенной в объем промежутка (рисунок 6, кривая 1), имеет области быстрого и медленного роста, первая из которых соответствует стадии формирования разряда, а вторая – стадии горения. За границу раздела областей принята точка, в которой крутизна зависимости уменьшается на порядок. Точка определяет энергию формирования разряда – W_s . Время, за которое эта энергия вводится в разряд, считается временем формирования разряда – t_f . Эти величины используются для оценки эффективности газоразрядной системы. Основная часть энергии, запасенной в накопительной емкости (70–80 %), вводится в промежуток на стадии формирования разряда, когда электронная температура высока, и расходуется на возбуждение электронных, колебательных и вращательных уровней частиц. Доля энергии, затрачиваемой на ионизацию (кривая 2 на рисунке 6), сравнительно мала (около 5 %).

Как показывают результаты численного эксперимента, на стадии формирования разряда электроны выходят из катода в основном за счет фотоэлектронной эмиссии под действием УФ-излучения разряда (рисунок 7). Ток ион-электронной эмиссии примерно в два раза меньше фототока. Это обусловлено интенсивным возбуждением и высвечиванием высокоэнергетических состояний частиц, излучательный переход которых приводит к образованию фотонов с энергией больше работы выхода катода.

Получены зависимости напряжения, тока разряда, степени перенапряжения, энергии и времени формирования от основных параметров системы возбуждения разряда: скорости роста напряжения, величин обострительной емкости и индуктивности разрядного контура, начальной концентрации электронов, состава газовой смеси, давления и межэлектродного расстояния, параметров контура накачки.

Зависимость степени перенапряжения от крутизны фронта (рисунок 8) в диапазоне $10^{11} - 2 \cdot 10^{13}$ В/с, с погрешностью не более 10 %, может быть аппроксимирована простым соотношением вида:

$$\Lambda = \frac{U - U_c}{U_c} = \alpha \sqrt[3]{\frac{dU}{dt}}, \quad (8)$$

где U – напряжение на промежутке, U_c – статическое напряжение зажигания разряда, $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-4}$ ($\text{с}^{1/3} / \text{В}^{1/3}$) – некоторый коэффициент, зависящий от рода газа.

Энергия формирования разряда увеличивается с ростом крутизны импульса, а время формирования разряда уменьшается и стремится к некоторой постоянной величине (рисунок 9).

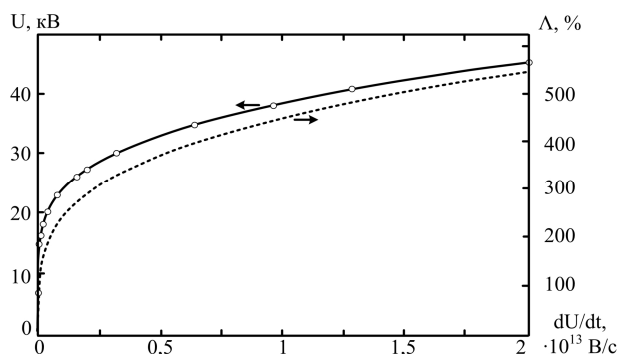


Рисунок 8 – Зависимости максимального напряжения на промежутке и степени перенапряжения (пунктир) от крутизны фронта

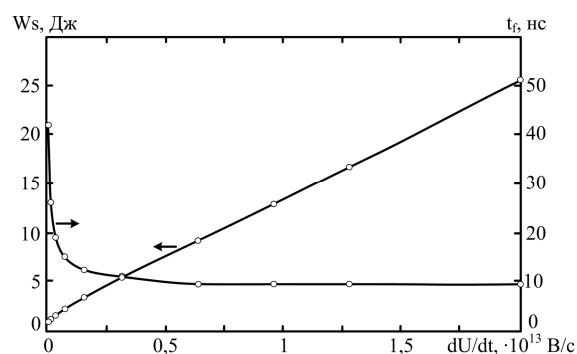


Рисунок 9 – Зависимости энергии и времени формирования разряда от крутизны фронта при постоянной обострительной емкости - 5 нФ

Увеличение индуктивности разрядного контура практически не влияет на энергию формирования разряда, но увеличивает время формирования.

Изменение площади электродов не оказывает существенного влияния на основные интегральные параметры разряда (напряжение, ток, динамику ионизации, энергетические характеристики), но приводит к существенному

уменьшению напряженности поля у катода, что является следствием изменения параметров катодного падения потенциала.

Увеличение начальной концентрации приводит к более раннему пробою промежутка при меньших напряжениях. С ростом концентрации начальных электронов от 10^5 до 10^{12} см^{-3} энергия формирования разряда незначительно уменьшается, а время формирования разряда увеличивается, причем наиболее существенный рост времени формирования разряда начинается при концентрации начальных электронов более 10^{10} см^{-3} .

С увеличением содержания азота в азотно-гелиевой рабочей смеси напряжение зажигания возрастает. Зависимость энергии формирования разряда от содержания азота в рабочей смеси имеет максимум при концентрации азота около 8 %. Время формирования разряда с увеличением содержания азота в смеси возрастает. Зависимости энергии формирования разряда от давления рабочей смеси и межэлектродного расстояния имеют четко выраженные максимумы.

В четвертой главе исследовано влияние параметров системы возбуждения (скорость роста напряжения, величины обострительной емкости и индуктивности разрядного контура, начальная концентрация, состав газовой смеси, давление и межэлектродное расстояние, параметры контура накачки) на характеристики накачки: эффективность накачки (отношение количества возбужденных частиц к энергии формирования разряда), приведенную напряженность поля в промежутке, концентрацию электронов, инверсию.

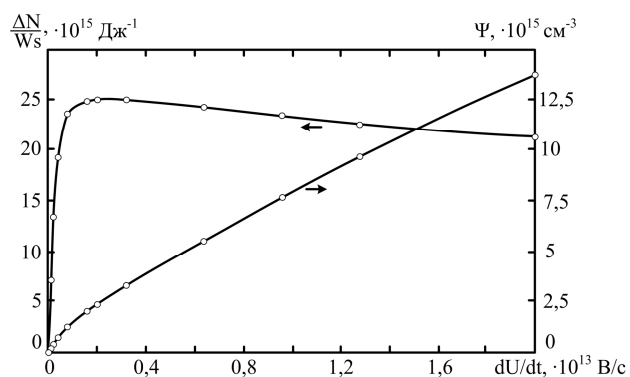


Рисунок 10 – Зависимость максимальной плотности инверсии ψ и эффективности накачки $\Delta N/W_s$ от скорости нарастания напряжения на промежутке при постоянном значении емкости – 5 нФ

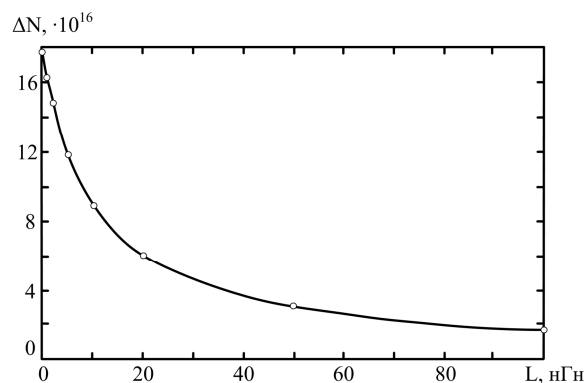


Рисунок 11 – Зависимость максимально достигаемой инверсии лазерных уровней $C^3P_u - B^3P_g$ в объеме промежутка от величины индуктивности разрядного контура (в идеализированном случае при $L_2=0$, $\Delta N=1,78 \cdot 10^{16}$)

С увеличением крутизны фронта в диапазоне $10^{11} - 2 \cdot 10^{13}$ В/с эффективность системы накачки резко растет, достигает максимума при значении крутизны около $2 \cdot 10^{12}$ В/с (что соответствует степени перенапряжения 200-300 %), а далее уменьшается (рисунок 10). Наличие максимума объясняется действием ряда противоположно направленных факторов. С одной стороны, с ростом крутизны увеличивается достигаемая степень перенапряжения, воз-

растают напряжение заряда емкости и запасаемая энергия, уменьшается длительность импульса накачки, что приводит к увеличению эффективности. С другой стороны, повышение напряжения на промежутке приводит к увеличению напряженности поля и смещению преимущественного энерговклада от процессов возбуждения к ионизации, что уменьшает эффективность накачки лазерной системы.

Максимально достигаемая инверсия лазерных уровней $C^3P_u - B^3P_g$ в объеме промежутка растет с увеличением крутизны фронта (рисунок 10), но уменьшается с ростом индуктивности разрядного контура (рисунок 11). Теоретический максимум инверсии, равный $1,78 \cdot 10^{16}$ при нулевом значении индуктивности, фактически достигается при значении индуктивности менее 5 нГн.

С увеличением концентрации начальных электронов промежутков пробивается при меньшем напряжении. В результате уменьшаются значения максимальной напряженности поля и концентрации электронов в области плазмы. Это приводит к уменьшению числа возбуждений верхнего лазерного уровня. Как следствие, максимальная инверсия с ростом концентрации начальных электронов снижается (особенно сильно при концентрации больше 10^{10} см^{-3}).

Зависимость достигаемой инверсии от концентрации азота имеет максимум, смещающийся в сторону больших концентраций с увеличением амплитуды импульса напряжения, прикладываемого к промежутку.

На основании полученных данных сформулированы практические рекомендации по повышению эффективности азотного лазера с накачкой поперечным разрядом.

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования объемного разряда для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом.

Экспериментальная установка (рисунок 12) состояла из разрядного промежутка, расположенного в камере с газовой смесью, и схемы формирования импульсов возбуждения. Измерительная часть установки включала

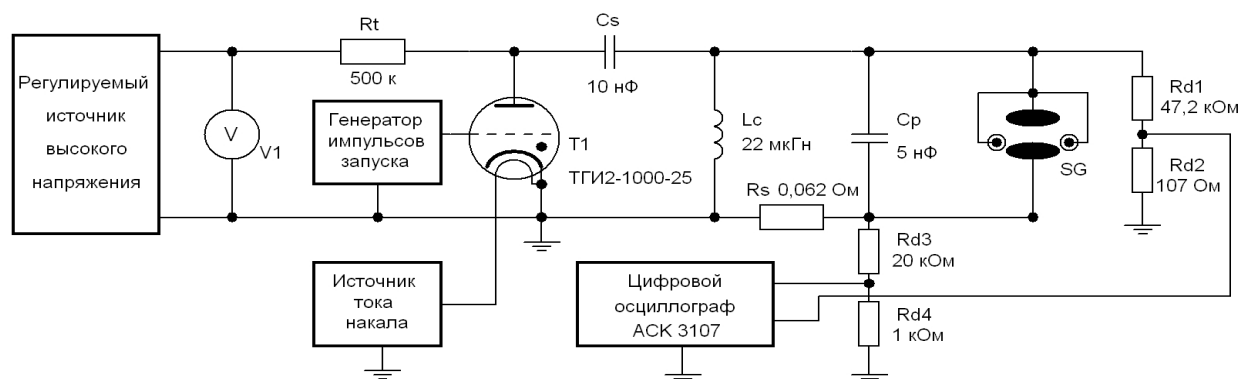


Рисунок 12 – Электрическая схема экспериментальной установки

цифровой осциллограф, делитель напряжения и шунта для контроля тока. Параметры установки соответствуют приведенным выше условиям азотного лазера.

Результаты моделирования достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными данными (рисунок 13), что позволяет сделать вывод о физической достоверности разработанной модели объемного разряда. Расходимость по напряжению зажигания и амплитуде тока разряда не превышает 15 %, по длительности формирования разряда - не более 50 %, по длительности горения разряда не более 15 %.

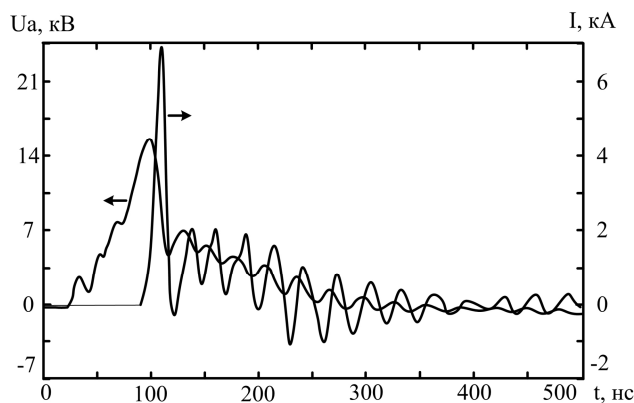


Рисунок 13 – Осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда, полученные математической обработкой результатов эксперимента

различных газах при давлении 200-2000 Торр и межэлектродном расстоянии 0,4 мм – 4 см.

Программный комплекс позволяет получить основные данные о процессе формирования разряда в чистых газах (He, Ne, Ar, N₂, H₂, Kr, Xe):

- временные диаграммы тока разряда и напряжения на промежутке;
- пространственные профили распределения концентраций электронов и ионов в промежутке в различные моменты времени;
- пространственные профили распределения напряженности электрического поля и потенциала в промежутке в различные моменты времени;
- временную диаграмму тока ион-электронной эмиссии;
- временную диаграмму напряженности поля у катода;
- временную диаграмму суммарной энергии, вложенной в разряд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе методами численного моделирования и экспериментально исследованы физические процессы, происходящие при формировании объемного разряда в различных условиях его возбуждения, таких как межэлектродное расстояние, давление и состав газовой смеси, крутизна фронта импульса напряжения, параметры цепи накачки и разрядного контура,

Основным отличием теоретических и экспериментальных временных диаграмм является наличие колебательного процесса с частотой около 30 МГц. Осцилляции, вероятно, связаны с контуром, образованным обострительной емкостью и распределенными паразитными индуктивностями цепи разряда.

В шестой главе дано описание разработанного программного комплекса для моделирования динамических процессов в газовом разряде, предназначенного для расчета формирования разряда в

начальная концентрация электронов. Получены следующие основные результаты:

1. Разработана самосогласованная модель формирования сильноточного (до 100 кА) высоковольтного (до 50 кВ) объемного разряда в газовых смесях при давлении 200 – 2000 Торр и межэлектродном расстоянии $4 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-2}$ м. Высокая достоверность результатов моделирования обеспечивается использованием в численном алгоритме модели ряда инновационных элементов:

– учет фотоэмиссии электронов с катода под действием резонансных линий собственного излучения разряда;

– совместный самосогласованный расчет развития разряда (перераспределение потенциала в промежутке под действием пространственного заряда) с уравнениями внешней цепи с емкостными и индуктивными элементами;

– вычисление динамики процессов ионизации, возбуждения электронным ударом, упругих соударений и направленного движения решением уравнения Больцмана в приближении локального поля.

Модель может быть использована для расчета формирования разряда в приборах плазменной электроники: газоразрядных лазерах, плазменных панелях, разрядниках, коммутационных приборах.

2. С помощью модели в наносекундном диапазоне времени получены количественные данные о динамике изменения напряжения и тока разряда, концентрации электронов и ионов, распределения потенциала, фотоэлектронной и ион-электронной составляющих тока катода, энергии, вводимой в промежуток, и инверсии возбуждённых молекул.

3. Установлено, что на стадии формирования разряда основным вторичным процессом на катоде является фотоэмиссия под действием собственного излучения разряда, а ток ион-электронной эмиссии составляет 20 – 50 % фототока. На стадии горения разряда ток ион-электронной эмиссии значительно превышает ток фотоэмиссии.

4. Показано, что динамическое напряжение зажигания (при скорости роста напряжения $10^{11} - 2 \cdot 10^{13}$ В/с) при постоянном значении произведения межэлектродного расстояния на давление возрастает с увеличением межэлектродного расстояния и уменьшается с ростом давления.

5. Предложено аппроксимационное соотношение (погрешность не более 10 %) для вычисления достигаемой степени перенапряжения:

$$\Lambda = \alpha \sqrt[3]{\frac{dU}{dt}},$$

где Λ – степень перенапряжения, α – константа, зависящая от рода газа (газовой смеси), dU/dt – скорость нарастания напряжения на электродах (крутизна фронта).

6. Установлено, что скорость ввода энергии в разряд на стадии формирования существенно (в 10 – 50 раз) больше, чем на стадии горения. Основная (70 – 80 %) часть энергии, запасенной в накопительной емкости, вводится в объем промежутка на стадии формирования разряда, и для повышения эф-

фективности системы накачки целесообразно минимизировать длительность стадии горения.

7. Получены зависимости напряжения, тока разряда, степени перенапряжения, энергии и времени формирования от основных параметров системы возбуждения разряда: скорости роста напряжения, обострительной емкости, индуктивности разрядного контура, начальной концентрации электронов, состава газовой смеси, давления и межэлектродного расстояния, параметров контура накачки. Установлены следующие закономерности:

- с увеличением крутизны импульса возбуждения время формирования разряда уменьшается и стремится к некоторой постоянной величине;

- увеличение индуктивности разрядного контура от 1 до 100 нГн приводит к росту времени формирования разряда, а энергия формирования разряда при этом практически не изменяется;

- повышение концентрации начальных электронов в пределах 10^{10} – 10^{12} см⁻³ увеличивает время формирования разряда и практически не влияет на энергию его формирования.

8. Для условий азотного лазера с накачкой поперечным разрядом показано существование оптимальной скорости нарастания напряжения на электродах, при которой достигается максимальная эффективность накачки (отношение максимальной инверсии к энергии формирования разряда).

9. Установлено, что в азотно-гелиевой смеси зависимость максимальной инверсии уровней $C^3P_u - B^3P_g$ от концентрации азота при её значении (5 – 8) % имеет максимум, который смещается в сторону больших концентраций с увеличением амплитуды импульса напряжения.

10. Экспериментально подтверждена высокая достоверность результатов компьютерного моделирования процессов в азотном лазере при напряжении до 15 кВ, токе до 10 кА в интервале времени от 10 до 500 нс.

11. На основе разработанной самосогласованной модели формирования сильноточного высоковольтного объемного разряда создан программный комплекс, предназначенный для расчета развития разряда в чистых газах (He, Ne, Ar, N₂, H₂, Kr, Xe).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Коротченко В. А., Суворов Д. В. Бесконтактный контроль искрового разряда в автомобильных свечах // Электроника: межвузовский сборник трудов - Рязань: РГРТА, 2003. С. 20–23.

2. Коротченко В. А., Суворов Д. В. Оперативный индикатор напряжения зажигания автомобильных свечей // Информационные технологии в электронике: межвузовский сборник трудов. - Рязань: РГРТА, 2004. С. 34–38.

3. Коротченко В. А., Суворов Д. В., Панкратов Е. И. Моделирование процесса формирования искрового разряда // Электроника: межвузовский сборник трудов. - Рязань: РГРТА, 2005. С.14–19.

4. Коротченко В. А., Суворов Д. В., Панкратов Е. И. Моделирование распада плазмы в газоразрядных индикаторных панелях // Электроника: межвузовский сборник трудов. - Рязань: РГРТА, 2005. С. 20–25.

5. Коротченко В. А., Суворов Д. В., Панкратов Е. И. Исследование газового разряда в герконе // МНПК "Магнитоуправляемые контакты (герконы) и изделия на их основе": Сборник трудов. – Рязань, 2005. С. 122-125.
6. Коротченко В. А., Суворов Д. В. Динамика перехода газовой среды в проводящее состояние // Вестник РГРТА. Вып. 18. - Рязань: РГРТУ, 2006. С. 95 – 100.
7. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Самосогласованная модель формирования объемного разряда. I. Физико-математическая основа модели // Вестник РГРТА. Вып. 20. - Рязань: РГРТУ, 2007. С. 103-107.
8. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Самосогласованная модель формирования объемного разряда. II. Численная модель формирования разряда // Вестник РГРТУ. Вып. 21. - Рязань: РГРТУ, 2007. С. 69-73.
9. Суворов Д.В., Коротченко В.А. Влияние индуктивности разрядного контура и площади электродов на параметры объемного разряда // Вестник РГРТУ. Вып. 22. - Рязань: РГРТУ, 2007. С. 110-114.
10. Суворов Д.В., Коротченко В.А. Влияние крутизны фронта напряжения на характеристики объемного разряда // Вестник РГРТУ. Вып. 23. - Рязань: РГРТУ, 2007. С. 114-118.
11. Карабанов С.М., Коротченко В.А., Козлов Б.А., Суворов Д.В. «Влияние крутизны фронта нарастания напряжения между электродами на достигаемую степень перенапряжения и электродинамические характеристики разряда» // VIII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул AMPL-2007»: тезисы докладов. - Томск, 2007. С. 157-158.
12. Суворов Д. В. Аналитическое соотношение для вычисления динамического напряжения пробоя // Электроника: межвузовский сборник трудов. - Рязань: РГРТУ, 2007. С. 45-48.
13. Karabanov S.M., Korotchenko V.A., Suvorov D.V. Computational investigation of volume discharge in a nitrogen laser // AVS 54-th International Symposium in Seattle, 2007.
14. Коротченко В. А., Суворов Д. В. Повышение эффективности азотного лазера // V Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников и источников света» - Саранск, 2007. С. 3-4.
15. Суворов Д. В., Заводовский А.А. Программный комплекс для моделирования динамических процессов в газовом разряде // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции. Часть II. – Рязань: РГРТУ, 2008. С. 158-159.
16. Заводовский А.А., Суворов Д.В. Кинетическая модель формирования плазмы в газоразрядных коммутаторах // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции. Часть II. – Рязань: РГРТУ, 2008. С. 160-161.
17. Суворов Д.В., Козлов Б.А., Коротченко В.А. Исследование формирования импульсного разряда в плотных газах // Вестник РГРТУ, № 2 (вып. 24). - Рязань: РГРТУ, 2008. С. 95-100.