

УДК 621.387.322

*Д.В. Суворов, Б.А. Козлов, В.А. Коротченко***ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА
В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ**

Приведены результаты эксперимента по исследованию импульсного объемного разряда в газе при атмосферном давлении. Для условий, соответствующих эксперименту, проведено математическое моделирование формирования разряда. Показано, что на стадии формирования (15 – 20 нс; 10 – 20 кВ; 5 – 10 кА) основным вторичным процессом на катоде является фотоэмиссия электронов под действием собственного излучения разряда. Установлено, что на этой стадии в объем промежутка вводится основная часть энергии (70-80 %).

Введение. Объектом настоящего исследования является объемный высоковольтный разряд – самостоятельный разряд, возбуждаемый в предварительно ионизированном газе при высоких перенапряжениях [1, 2] и широко применяемый в системах накачки импульсных газовых лазеров УФ и ВУФ диапазонов [2, 7, 8].

В наших предыдущих исследованиях [3-6] разработана модель формирования объемного разряда [3, 4] и приведены результаты моделирования влияния различных параметров системы возбуждения на основные параметры разряда [5, 6]. Целью данной работы являлось получение экспериментальных данных о параметрах объемного разряда и его моделирование для условий эксперимента.

1. Методика проведения эксперимента.

Экспериментальная установка состояла из разрядного промежутка, расположенного в камере с газовой смесью, схемы формирования импульсов возбуждения. Измерительная часть установки включала цифровой осциллограф, делитель напряжения и шунт тока.

Параметры разрядного промежутка: межэлектродное расстояние – 12 мм, давление – 760 Торр, состав газовой смеси – 95 % гелия и 5 % азота, площадь электродов – $33,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Анод выполнен в виде цилиндрического стержня, а катод – в виде стержня с профилем Берда, что обеспечивало достаточно однородное электрическое поле. Для создания начальной концентрации электронов на фронте импульса возбуждения вблизи анода располагались два электрода барьерного разряда (рисунок 1).

Схема формирования импульсов возбуждения (рисунок 2) состояла из регулируемого источника высокого напряжения (5 - 20 кВ), газоразрядного коммутатора (тиратрон ТГИ2-1000-

25), накопительной емкости C_s (10 нФ) и зарядной индуктивности L_p (22 мкГн). Управление тиратроном осуществлялось с помощью генератора импульсов амплитудой 1,5 кВ и длительностью 5 мкс. Накопительная емкость была собрана из конденсаторов КВИ-3 (4700 пФ, 10 кВ), соединенных параллельно-последовательно.

Обострительная емкость C_p (5 нФ) представляла собой два ряда керамических конденсаторов КВИ-2 (100 пФ, 20 кВ), расположенных по обе стороны от разрядного промежутка (рисунок 1). Промежуток вместе с обострительными конденсаторами помещался в вакуумную стеклянную камеру с электрическими выводами для подачи импульсов возбуждения.

В целом электродная система, газовое наполнение и схема формирования импульсов возбуждения соответствуют условиям азотного лазера с накачкой поперечным разрядом.

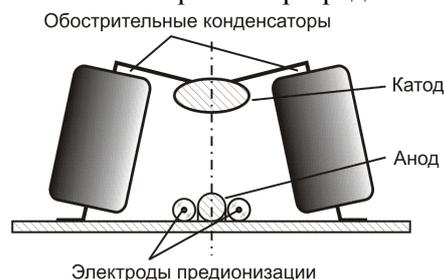


Рисунок 1 – Структура электродной системы разрядного промежутка

Для осциллографирования напряжения на промежутке использован резистивный делитель. Верхнее плечо делителя представляло собой последовательно параллельную сборку восьми резисторов ТВО-2 120 кОм (последовательно соединялись две параллельных сборки по четыре резистора в каждой). Общее измеренное сопротивление сборки составило 47,2 кОм. Нижнее

плечо делителя образовано четырьмя соединенными параллельно резисторами SMD 0805 430 Ом. Делитель подключался непосредственно

к выводу электрода стеклянной камеры, соединенному с катодом.

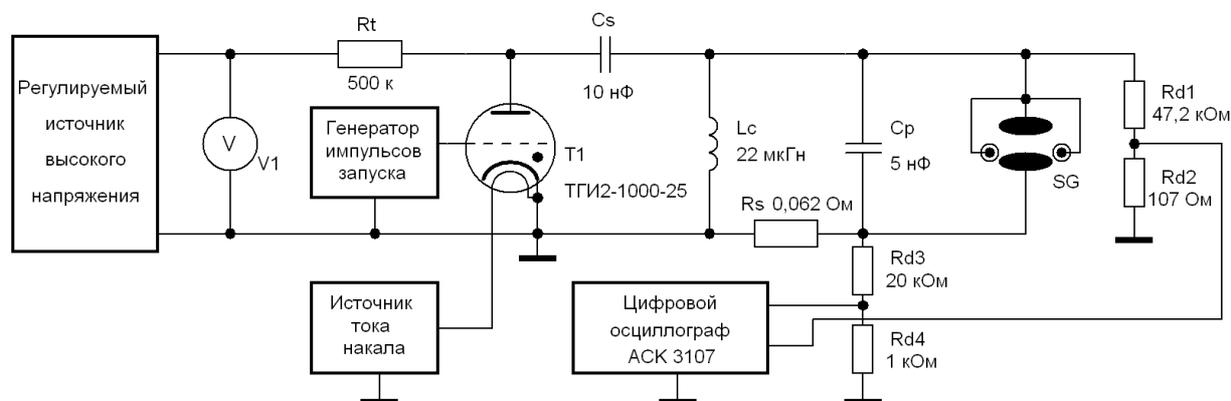


Рисунок 2 – Электрическая схема экспериментальной установки

Для осциллографирования тока в цепи накачки (внешней по отношению к разрядному контуру) в цепь включен шунт тока R_s , состоящий из 82-х соединенных параллельно резисторов ТВО-0,5 5,1 Ом. Общее измеренное сопротивление шунта равнялось 0,062 Ом. Сигнал с шунта поступал на вход осциллографа через резисторный делитель, уменьшающий амплитуду сигнала до уровня нескольких вольт. С целью снижения наводок резисторный делитель располагался непосредственно у входа осциллографа, в разъеме кабеля. В делителе были использованы SMD резисторы типа 1206. Все использованные типы резисторов являются малоиндуктивными, благодаря чему искажения в полученных осциллограммах минимальны.

Выходные сигналы с делителя и шунта поступали к осциллографу по кабелю с волновым сопротивлением 50 Ом типа РК50-0.6-23. В установке использован цифровой четырехканальный осциллограф АСК 3107 фирмы АКТАКОМ, в котором при наблюдении сигналов с малой временной разверткой (менее 1 мкс в клетке) реализуется стробоскопический режим с эквивалентной частотой выборок – 10 Гвыб/с.

2. Результаты эксперимента. К разрядному промежутку прикладывались импульсы возбуждения с частотой 1 - 3 Гц и крутизной переднего фронта 50 - 100 нс. Амплитуда импульсов определялась напряжением заряда накопительной емкости и изменялась от 5 до 20 кВ. При малой амплитуде импульсов (<12 кВ) разряд в промежутке не возникал, и осциллограммы напряжения на промежутке и тока во внешней цепи имели вид, изображенный на рисунке 3, а.

При увеличении амплитуды импульсов (≥ 18 кВ) в промежутке зажигался разряд, и на-

блюдалось однородное сине-фиолетовое свечение. Временные диаграммы тока и напряжения при этом имеют вид изображенный на рисунке 3, б.

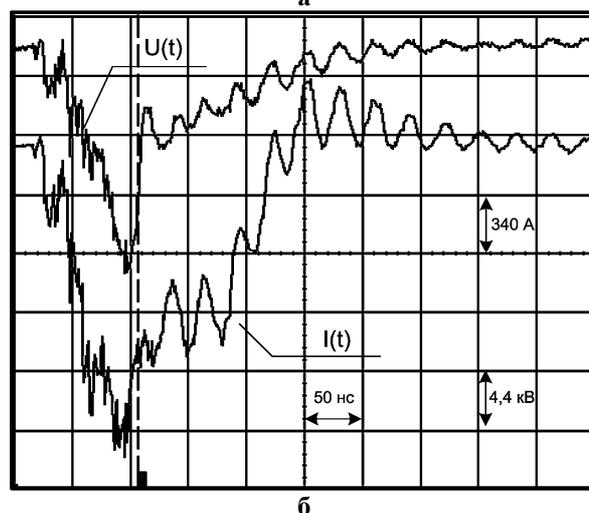
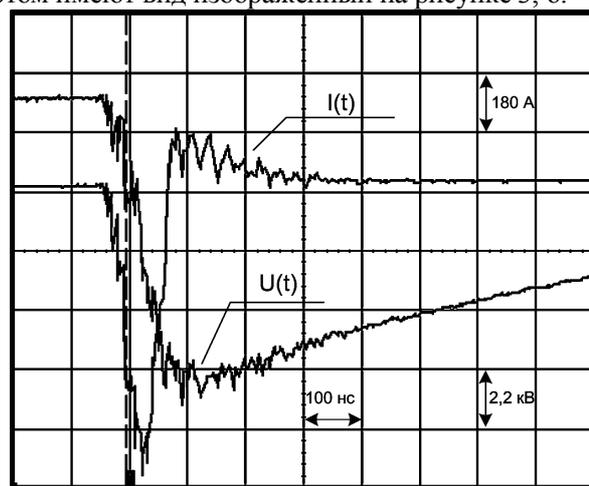


Рисунок 3 – Осциллограммы напряжения на промежутке и тока внешней цепи: а – без пробоя, б – при пробое промежутка

Из рисунка видно, что пробой промежутка происходит на фронте импульса возбуждения при напряжении 16,5 кВ. После пробоя напряжение на промежутке за достаточно короткий интервал времени (~ 15 нс) падает до напряжения горения разряда (4 - 6 кВ). На стадии горения разряда, продолжающейся примерно 300 нс, напряжение уменьшается почти до нуля в результате разряда обострительной емкости.

На полученных осциллограммах (рисунок 3) видны осцилляции контура, образованного обострительной емкостью и паразитной индуктивностью разрядного контура.

3. Обработка полученных данных. Цель обработки данных эксперимента состояла в получении временной диаграммы тока разряда. Запишем уравнение, связывающее ток разряда I_D с напряжением на обострительном конденсаторе U_{Cp} и током контура накачки J :

$$I_D(t) = J(t) - C_p \frac{dU_{Cp}(t)}{dt}. \quad (1)$$

При малых значениях индуктивности разрядного контура напряжение на промежутке можно считать равным напряжению на обострительной емкости.

Прямое дифференцирование осциллограммы напряжения содержащей наводки приводит к возникновению ошибок (хаотичных пиков тока). Для их устранения использовалось сглаживание полученных осциллограмм методом локальной регрессии [9]. Проводя математическое преобразование обработанных данных в соответствии с формулой (1) и принимая ток разряда до момента пробоя равным нулю, получаем временную диаграмму тока разряда (рисунок 4).

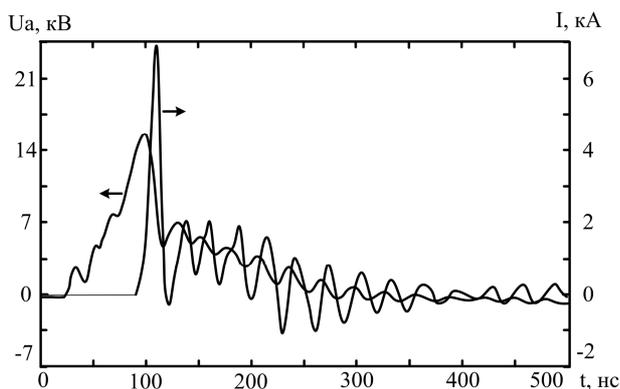


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжения на промежутке и тока разряда, полученные математической обработкой результатов эксперимента. Временные диаграммы инвертированы для удобства восприятия

4. Моделирование формирования разряда. Для условий, соответствующих эксперименту, проведено численное моделирование форми-

рования разряда. Паразитная индуктивность разрядного контура полагалась равной 1 нГн, индуктивность контура накачки – 500 нГн, сопротивление разрядного контура (омическое) – 10 мОм, начальное напряжение накопительной емкости – 18 кВ, 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.

4.1. Процессы на фронте импульса возбуждения. На фронте импульса возбуждения разряда в объеме промежутка образуются начальные электроны. Механизм их образования – фотоионизация примесей рабочей смеси импульсом УФ излучения от барьерного вспомогательного разряда [2]. При малой длительности фронта импульса возбуждения (менее 100 нс) начальные электроны успевают переместиться лишь на небольшое расстояние и их концентрация не изменяется в большей части объема промежутка. Исключение составляет прикатодная область, баланс электронной концентрации в которой определяется уходом электронов предионизации и поступлением электронов, рожденных вторичными процессами на катоде. Как видно из рисунка 5, на фронте импульса возбуждения концентрация электронов в прикатодной области примерно на порядок меньше их концентрации в основном объеме (кривые 2 – 4).

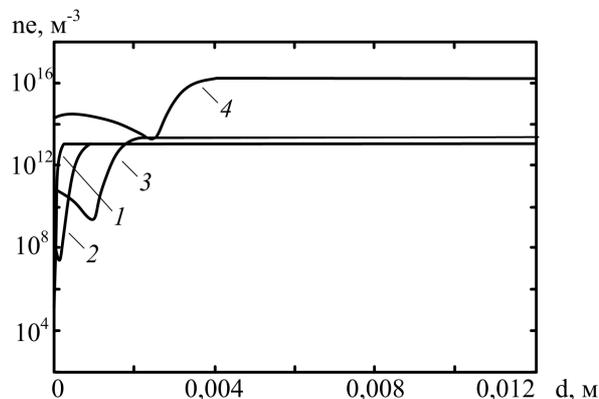


Рисунок 5 - Распределение концентрации электронов и ионов в различные моменты времени начальной стадии развития разряда: 1 - 20 нс, 2 - 40 нс, 3 - 60 нс, 4 - 80 нс

Поскольку квантовый выход и коэффициент вторичной эмиссии неодинаков для всей поверхности катода и имеются участки с повышенной и пониженной фото- и ион-электронной эмиссией, то концентрация электронов в прикатодной области будет неодинакова для различных участков поверхности катода. Неоднородность распределения концентрации (и соответственно напряженности поля) может стать причиной развития неустойчивости и привести к

контракции разряда.

4.2. Пробой, формирование объемного разряда. С некоторого момента времени, когда приведенная напряженность превысит определенное значение, начинается интенсивная ионизация газа электронами. Концентрация электронов резко возрастает и проявляется искажение поля в промежутке пространственным зарядом. Длина прикатодной области, обеднённой электронами, существенно увеличивается и достигает приблизительно четверти длины промежутка (кривая 1 на рисунке 6). Напряженность поля вблизи катода становится выше, чем в остальной части промежутка.

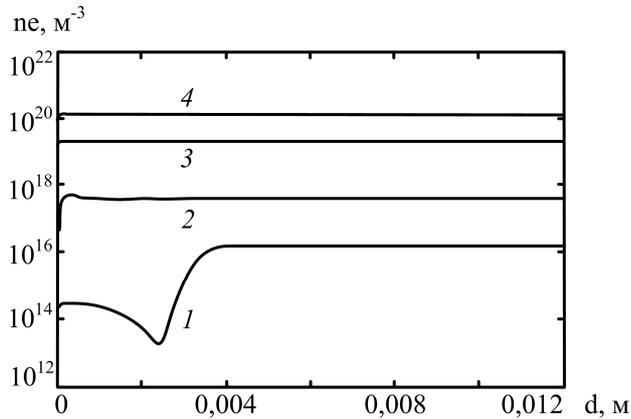


Рисунок 6 – Распределение концентрации электронов и ионов в различные моменты времени, соответствующие пробую промежутка: 1 – 80 нс, 2 – 90 нс, 3 – 100 нс, 4 – 110-130 нс

В области повышенной напряженности поля ионизация усиливается, и концентрации заряженных частиц в прикатодной области и за её пределами быстро выравниваются (кривая 2 на рисунке 6). У катода образуется область с высокой напряженностью поля (кривая 3 на рисунке 7), и формируется катодное падение потенциала.

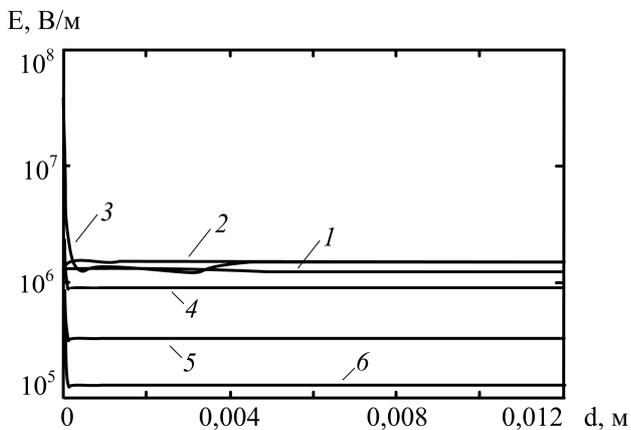


Рисунок 7 – Распределение напряженности поля в различные моменты времени, соответствующие пробую промежутка: 1 – 80 нс, 2 – 90 нс, 3 – 100 нс, 4 – 110 нс, 5 – 120 нс, 6 – 130 нс

В этой области концентрация электронов определяется потоком вторичных электронов с катода. Она меньше концентрации электронов в области плазмы ($10^{19} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$) и составляет в различные моменты времени $10^{16} - 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Ширина катодной области для описанных условий численного эксперимента составляет 20-30 мкм. Катодное падение потенциала оказывается сравнительно небольшим – около 15 % напряжения между электродами.

За короткий интервал времени от 80 до 100 нс концентрация заряженных частиц в области плазмы возрастает на три порядка (до 10^{19} м^{-3}), ток разряда увеличивается до сотен ампер, крутизна роста тока составляет $10^{12} - 10^{13} \text{ А/с}$ (рисунок 8). При такой большой крутизне становится значимым (около 5 %) уменьшение напряжения на промежутке из-за паразитной индуктивности контура, в результате чего снижаются интенсивность ионизации и скорость роста тока.

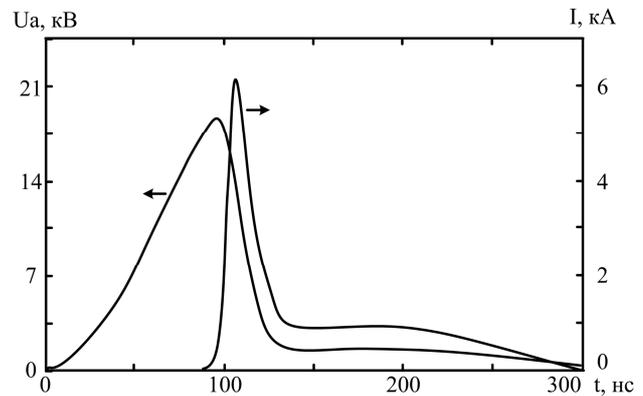


Рисунок 8 – Напряжение и ток разряда, полученные численным моделированием

После того как ток разряда превысит ток заряда обострительной емкости (~100 нс на рисунке 8) напряжение на промежутке уменьшается. 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 в результате интенсивной ионизации, несмотря на снижение напряжения (рисунок 8). В момент времени приблизительно 110 нс ток достигает максимального значения и далее уменьшается.

Концентрация зарядов в области плазмы при максимальном токе составляет 10^{20} м^{-3} и остается приблизительно постоянной в интервале 110 – 300 нс, а напряженность поля снижается из-за спада анодного напряжения и формирования области катодного падения потенциала (рисунок 9). Уменьшение напряженности приводит к снижению скорости направленного движения электронов и соответственно, – к резкому спаду

тока, так что длительность импульса тока оказывается весьма короткой (20 нс). Максимумы интенсивности ионизации и скорости роста тока соответствуют спаду напряжения до 80 % от «напряжения пробоя».

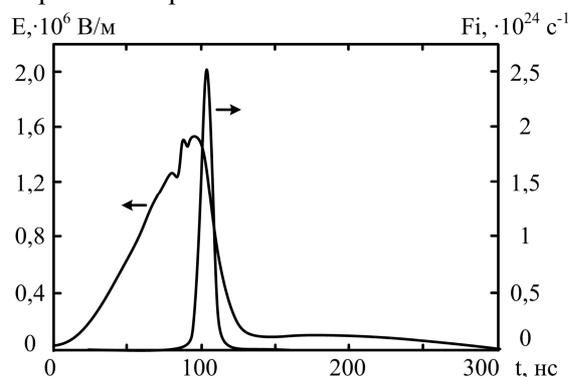


Рисунок 9 – Временная диаграмма интенсивности ионизации и напряженности поля в объеме промежутка

Интервал (90 – 130) нс, соответствующий резкому увеличению и спаду тока, условно считается стадией формирования разряда, а последующий интервал (130 – 200) нс, на котором ток практически не изменяется, – стадии горения.

Напряженность поля в области плазмы на стадии горения разряда остается практически постоянной, поскольку концентрация заряженных частиц также не изменяется. Анодное напряжение составляет (10 - 15) % от напряжения пробоя.

Временная зависимость энергии, введенной в объем промежутка (рисунок 10), имеет области быстрого и медленного роста, первая из которых соответствует стадии формирования разряда, а вторая, – стадии горения. Моделирование показало, что основная часть энергии (70-80%) вводится в промежуток на стадии формирования разряда. Большая часть этой энергии уходит на возбуждение электронных, колебательных и вращательных уровней частиц газа. Доля энергии, затрачиваемой на ионизацию (кривая 2 на рисунке 10), сравнительно мала (порядка 5 %).

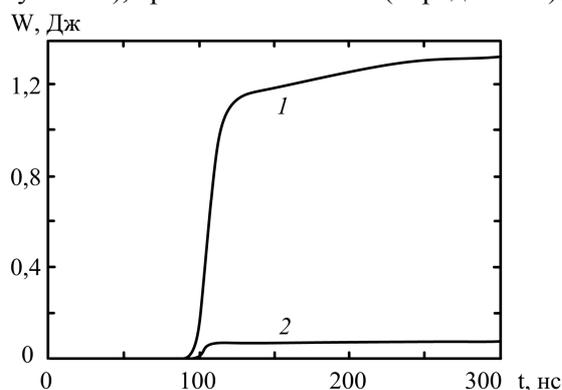


Рисунок 10 – Временная диаграмма суммарной энергии, вводимой в разряд (1), и энергии, затрачиваемой на ионизацию (2)

4.3. Вторичные процессы на катоде. Как показывают результаты численного эксперимента, на стадии формирования разряда ток фотоэлектронной эмиссии с катода под действием УФ-излучения разряда составляет основную часть тока вторичной эмиссии (рисунок 11). Ток ион-электронной эмиссии примерно в два раза меньше. Это обусловлено большой интенсивностью возбуждения и высвечивания высокоэнергетических состояний частиц газа, излучательный переход которых приводит к образованию фотонов с энергией больше 5 эВ. Высокая интенсивность возбуждения этих состояний обусловлена большой частотой возбуждения при значениях E/p , соответствующих пробоя. Интенсивность высвечивания определяется временем жизни частицы в возбужденном состоянии, которое при энергии уровней большей 5-7 эВ лежит в наносекундном диапазоне.

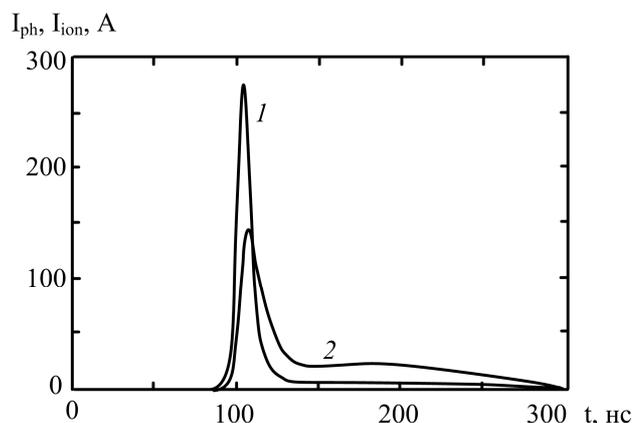


Рисунок 11 – Временная диаграмма фототока с поверхности катода (1) и тока ион-электронной эмиссии (2)

На стадии формирования разряда ток фотоэмиссии сначала резко возрастает, а затем экспоненциально уменьшается в результате того, что число возбуждений частиц газа становится меньше числа высвечиваний.

Ток вторичной ион-электронной эмиссии определяется произведением концентрации ионов вблизи катода на скорость их движения. На стадии формирования разряда напряженность поля около катода с течением времени повышается и возрастает скорость движения ионов. Одновременно резко увеличивается их концентрация у катода. В результате ток ион-электронной эмиссии увеличивается. Далее, после формирования разряда напряженность поля у катода снижается из-за спада напряжения на промежутке и ток ион-электронной эмиссии уменьшается.

5. Сопоставление результатов эксперимента и моделирования. Результаты моделирования достаточно хорошо коррелируют с экспе-

риментальными данными (рисунки 4 и 8), что позволяет сделать вывод о физической достоверности разработанной модели объемного разряда [3, 4]. 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 %.

Основным отличием теоретических и экспериментальных временных диаграмм является наличие ярко выраженного колебательного процесса с частотой около 30 МГц. Осцилляции, вероятно, связаны с наличием контура, образованного обострителем емкости и паразитными индуктивностями цепи разряда.

Заключение. Представленные результаты экспериментального и теоретического исследования высоковольтного сильноточного импульсного разряда в плотных газах позволяют сделать следующие наиболее значимые выводы:

– время формирования разряда в условиях, соответствующих азотному лазеру с накачкой поперечным разрядом, составляет 15-20 нс;

– на стадии формирования разряда основным вторичным процессом на катоде является фотоэмиссия под действием собственного излучения разряда;

– основная часть энергии (70-80%) вводится в объем промежутка на стадии формирования разряда;

– разработанная математическая модель разряда достаточно достоверно отражает физические процессы и может быть рекомендована для практического применения.

Библиографический список

1. Осипов В.В. Самостоятельный объемный разряд // УФН. 2000. Т. 170. №3. С. 225-245.
2. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.
3. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Самосогласованная модель формирования объемного разряда. I. Физико-математическая основа модели // Вестник РГРТА. – Вып. 20. – Рязань: РГРТУ. – 2007. С. 103-108.
4. 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.
5. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Влияние индуктивности разрядного контура и площади электродов на параметры объемного разряда // Вестник РГРТУ. – Вып. 22. – Рязань: РГРТУ. – 2007. С. 75-79.
6. Суворов Д.В., Коротченко В.А. Влияние крутизны фронта напряжения на характеристики объемного разряда // Вестник РГРТУ. – Вып. 23. – Рязань: РГРТУ. – 2008. С. 114-118.
7. Осипов В. В., Лисенков В. В. Формирование самостоятельного объемного газового разряда. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.4. С. 27–33.
8. Тарасенко В.Ф. Эффективность азотного УФ лазера с накачкой самостоятельным разрядом // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. №6. С. 489-494.
9. Draper, N.R and H. Smith, Applied Regression Analysis, 3rd Ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.