

03;04;10

Импульсный разряд в неоднородном электрическом поле в азоте и аргоне при повышенных давлениях

© М.В. Ерофеев, И.Д. Костыря, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 30 января 2007 г.)

Исследованы характеристики разряда и излучения в азоте, аргоне при давлениях 10–760 Торг и формировании разряда без предыонизации промежутка от дополнительного источника. При $E_0/p \sim 270 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$ и давлении азота $p \sim 70 \text{ Torr}$ зарегистрирован максимум на зависимости мощности излучения второй положительной системы азота от давления. В области давлений 10–760 Торг и длительности переднего фронта импульса напряжения $\sim 10 \text{ ns}$ за сетчатым анодом получен электронный пучок с различной длительностью импульса на полувисоте. Показано, что в данных условиях пучок электронов формируется на фронте импульса напряжения как при пробое промежутка, так и в отсутствие явно выраженного пробоя, а также при запаздывании пробоя промежутка в десятки наносекунд на переднем фронте импульса тока разряда.

PACS: 52.80.-s

Введение

При создании импульсных лазеров на плотных газах [1–4] и эксиламп с большой импульсной плотностью мощности излучения [5–8] для возбуждения обычно используются объемные импульсные разряды. Объемный характер разряда достигается за счет профилирования электродов для обеспечения однородного электрического поля и предыонизации промежутка от дополнительного источника. Одна из идей, которая объясняет формирование объемных разрядов при повышенных давлениях и сравнительно высоких электрических полях, заключается в создании достаточно высокой начальной концентрации электронов, равномерно распределенной по всему разрядному объему [9]. При этом необходимо, во-первых, чтобы головки электронных лавин перекрылись до достижения ими критического размера. Это возможно при выполнении условия $n_{e0} > (r_c)^{-3}$, где n_{e0} — начальная концентрация, создаваемая внешним ионизатором, а r_c — критический радиус головки электронной лавины, при достижении которого начинает формироваться стример. Во-вторых, из-за того что предыонизатор обычно действует в течение ограниченного времени и начальные электроны вследствие дрейфа уходят из слоя у катода толщиной x , необходимо, чтобы выполнялось неравенство: $x < r_c$. При некоторой начальной концентрации электронов (обычно $n_{e0} > 10^6 \text{ cm}^{-3}$), головки электронных лавин перекрываются до достижения ими критического размера и образования стримера. Соответственно в этих условиях формируется объемный разряд. Длительность объемной стадии разряда зависит от многих факторов и ограничивается контрагированием, например, из-за образования катодных пятен [10].

В высоких электрических полях при формировании объемного разряда может происходить отрыв части

электронов из головок электронных лавин [10,11]. Далее образуются лавинные цепочки и формируется сравнительно однородный разряд, состоящий из отдельных диффузных нитей, которые при высокой начальной концентрации электронов также могут перекрываться.

Весьма интересны объемные импульсные разряды, формируемые в неоднородном электрическом поле. С конца 1960-х гг. известно, что при использовании наносекундных импульсов высокого напряжения в гелии [12] и воздухе [13] атмосферного давления можно сформировать объемный (диффузный) разряд без источника дополнительной предыонизации. Работы в этом направлении стимулировались регистрацией рентгеновского излучения и пучков убегающих электронов при пробое промежутка импульсами высокого напряжения [12–18], см. также обзоры [19–21] и ссылки в них. В работах, выполненных в последние четыре года, было показано, что амплитуда тока пучка убегающих электронов в воздухе атмосферного давления достигает сотни ампер [22–24], см. также обзоры [25–28], а длительность тока пучка на полувисоте составляет $\sim 100 \text{ ps}$ [29–33]. В работах [34–37] было показано, что полярность импульса напряжения и форма потенциального электрода существенно не влияют на объемный характер разряда при использовании наносекундных импульсов напряжения с амплитудой $\sim 150 \text{ kV}$. Длительность импульса напряжения в [34–37] не превышала нескольких наносекунд, а передний фронт составлял $\sim 1 \text{ ns}$. При увеличении длительности импульса напряжения и его переднего фронта в подобных условиях наблюдалось контрагирование разряда и пучок убегающих электронов при атмосферном давлении воздуха за фольгой не регистрировался из-за малой энергии убегающих электронов [38]. При меньших давлениях в [38] исследования не проводились.

Цель настоящей работы — исследовать объемный разряд, формируемый в неоднородном электрическом поле без источника дополнительной предыонизации в азоте и аргоне в широком диапазоне давлений (10–760 Торг) при длительности импульса возбуждения в десятки наносекунд. Нами специально была увеличена длительность импульса напряжения и его передний фронт, чтобы определить время генерации пучка электронов в этих условиях, а также время запаздывания контрагирования разряда.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из импульсного генератора и газоразрядной камеры. В основу работы импульсного генератора положен принцип трансформирования напряжения в системе из двух связанных колебательных контуров. Подробно работа трансформаторов на связанных LC-контурх была описана в работе [39]. От импульсного трансформатора заряжалась коаксиальная линия, заполненная глицерином, с волновым сопротивлением $\sim 20 \Omega$, которая обеспечивала длительность импульса возбуждения на согласованной нагрузке ~ 45 ns. Длительность фронта импульса напряжения равнялась ~ 10 ns. В данной работе использовалась сравнительно большая длительность импульса напряжения. Это позволило изменять время запаздывания пробоя промежутка и определить время до контрагирования разряда в зависимости от давления газа. О контрагировании разряда свидетельствовало интенсивное излучение искрового канала в видимой области спектра. Конструкция газоразрядной камеры показана на рис. 1. Внутренний диаметр газоразрядной камеры равнялся 280 мм. Катод 4 был выполнен в виде четырех коаксиально

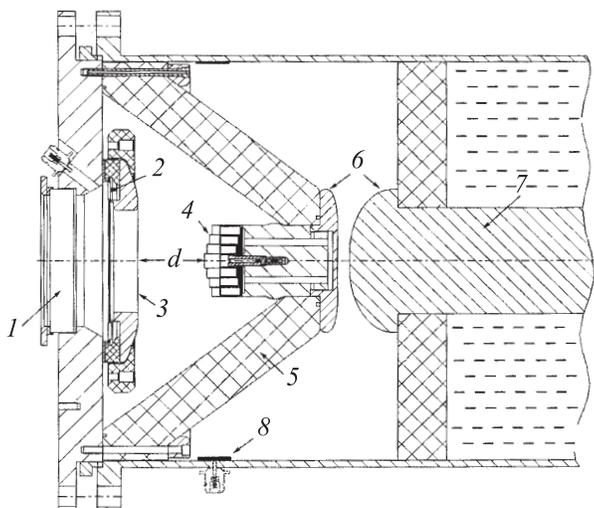


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры: 1 — кварцевое окно; 2 — токовый шунт; 3 — анодная сетка; 4 — катод; 5 — полиэтиленовый изолятор; 6 — обострительный разрядник; 7 — накопительная линия; 8 — емкостной делитель напряжения.

установленных трубок из фольги диаметром 60, 44, 28 и 12 мм и был прикреплен металлическим болтом к одному из электродов обострительного разрядника 6. Высота трубок из фольги уменьшалась от центра к краю катода на 2 мм с каждым увеличением диаметра трубки. Для изготовления катода использовалась латунная фольга толщиной 50 μm . Плоский анод 3 был изготовлен из латунной сетки с пропусканием 50% и соединен с корпусом камеры через шунт 2 из сопротивлений ТВО. Площадь сетчатой поверхности анода равнялась $\sim 60 \text{ cm}^2$. Расстояние между катодом и анодом d варьировалось в пределах от 20 до 50 мм. Импульсы излучения регистрировались через кварцевое окно 1 фотоприемником ФЭК-22 СПУ. Излучение второй положительной системы азота в области 300–400 нм и излучение в видимой области спектра разделялось с помощью светофильтров. При регистрации тока пучка электронов кварцевое окно 1 заменялось коллектором, который имел диаметр приемной части 30 мм и устанавливался на расстоянии 10 мм от сетки. Для регистрации напряжения, тока пучка и тока разряда использовался осциллограф TDS 3034 с полосой 0.3 GHz (2.5 Gs/s). Разрешение системы регистрации было не хуже 1.5 ns. Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В экспериментах были исследованы особенности импульсного разряда в азоте и аргоне для промежутка с неоднородным электрическим полем у катода. При изменении давления, зарядного напряжения коаксиальной линии и межэлектродного зазора регистрировались форма разряда и временные характеристики излучения разряда в различных спектральных областях, а также напряжение на промежутке, ток разряда и ток электронного пучка.

При зарядном напряжении коаксиальной линии ~ 100 kV и давлении 10–100 Торг длительность объемной стадии разряда в азоте и аргоне превышала 50 ns. Как уже отмечалось, объемный разряд в промежутке формировался без дополнительного источника предварительной ионизации. Длительность импульса напряжения, формируемого коаксиальной линией при разряде на согласованную нагрузку, составляла ~ 45 ns. Однако из-за различия сопротивления разрядной плазмы и волнового сопротивления коаксиальной линии длительность импульса возбуждения (тока разряда) была существенно больше 45 ns, так как при давлении 10–100 Торг наблюдался колебательный режим разряда. Это могло приводить к контрагированию разряда с запаздыванием более 50 ns. Появление искрового канала регистрировалось по увеличению мощности излучения в видимой области спектра. Контрагирование разряда в этих условиях не оказывало влияния на амплитуду сигнала с фотодиода, так как контрагирование наступало после

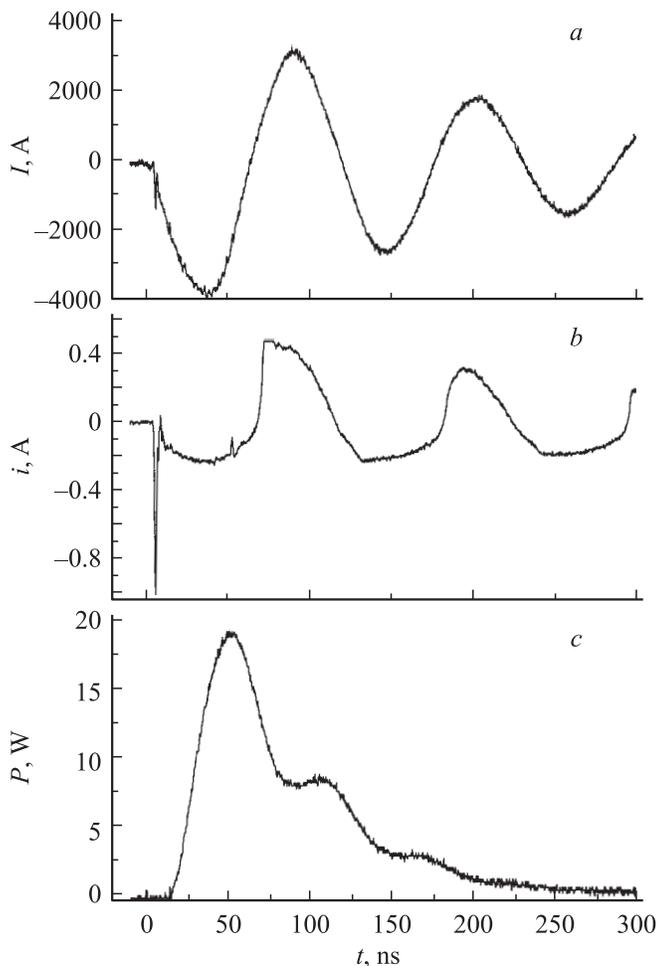


Рис. 2. Осциллограммы тока разряда (а), тока пучка электронов (b) и импульса излучения разряда (с) в азоте.

максимума мощности на импульсе излучения второй положительной системы азота.

На рис. 2 приведены осциллограммы тока разряда (а), тока пучка электронов за сеткой (b) и импульса излучения разряда (с) в азоте при давлении 10 Торг. Пробой промежутка с зазором $d = 4.5$ см происходил на фронте импульса напряжения при $U = 42$ кВ. Разряд в этих условиях имел сравнительно однородное свечение, которое наблюдалось по всему объему между анодом и катодом. Кроме объемного разряда в промежутке на катоде было видно несколько ярких пятен, а между центральным кольцом на катоде и сеткой наблюдался искровой канал с относительно слабым свечением. Импульс излучения, показанный на рис. 2, с, принадлежал второй положительной системе азота. Время появления искрового канала можно было определять по осциллограммам с ФЭК-22, и, как уже отмечалось, это время значительно превышало 50 ns.

Длительность импульса излучения второй положительной системы азота (полоса $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$) на полувысоте при давлении 10 Торг была максимальной и составляла ~ 50 ns. С увеличением давления длитель-

ность импульса излучения сокращалась, а разряд состоял из множества диффузных конусов. Число ярких пятен на катоде увеличивалось, и эти пятна были равномерно распределены по кромкам колец катода. Максимум мощности излучения второй положительной системы азота из промежутка достигался при давлении 50–70 Торг (рис. 3 и 4, d) и значении параметра $E_0/p \sim 270$ В/см · Торг (E_0 — отношение максимального напряжения на промежутке к межэлектродному зазору d). Отметим, что характеристики спонтанного излучения второй положительной системы азота ранее исследовались в подобных условиях при длительности импульса напряжения генератора в несколько наносекунд и межэлектродном зазоре ~ 1.5 см [40,41]. В условиях возбуждения наносекундными импульсами [41] наблюдалось увеличение мощности излучения с ростом давления азота до 1 атмосферы, что можно объяснить малой длительностью импульса возбуждения и улучшением согласования импедансов наносекундного генератора и разрядной плазмы с ростом давления азота. В условиях данного эксперимента основной энерговклад в разрядную плазму осуществлялся за время ~ 50 ns и более.

При давлении 100–600 Торг разряд переходил в контрагированную форму за время менее 50 ns, энергия излучения второй положительной системы азота уменьшалась и появлялось запаздывание импульса тока разряда относительно переднего фронта импульса напряжения на разрядном промежутке (рис. 5). Отметим, что при давлении менее 400 Торг в промежутке перед его пробоем имел место слаботочный разряд. Падение мощности излучения второй положительной системы азота с ростом давления обусловлено двумя причинами. Во-первых, при уменьшении параметра E_0/p уменьшается температура электронов и сечение возбуждения уровня $C^3\Pi_u$. Во-вторых, уменьшается энергия, вложенная в плазму объемного разряда. Запаздывание пробоя

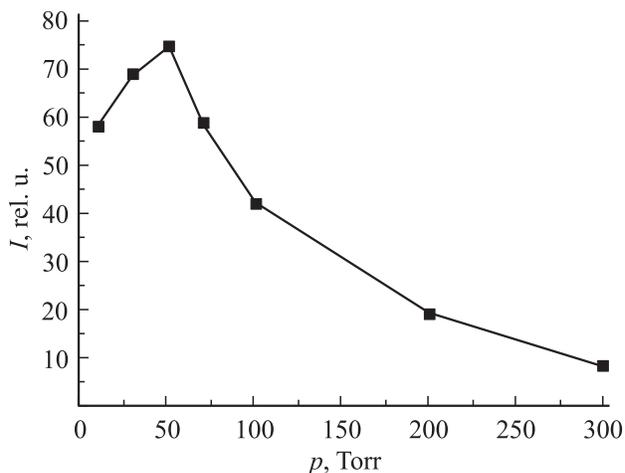


Рис. 3. Зависимость импульсной мощности излучения разряда в азоте от давления (величина разрядного промежутка $d = 4.5$ см).

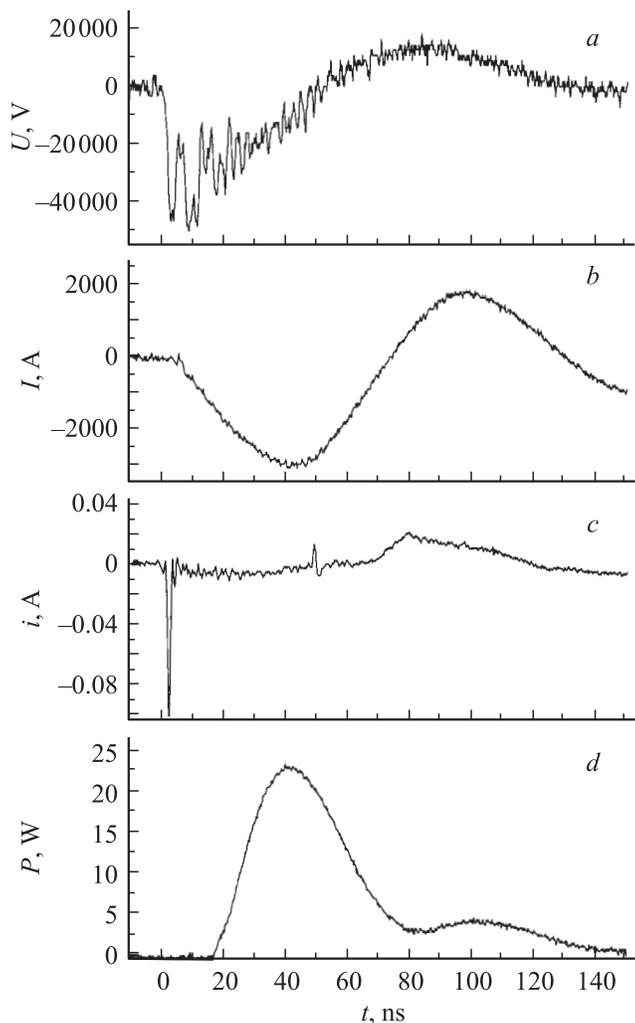


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке (*a*), тока разряда (*b*), тока пучка электронов (*c*) и импульса излучения разряда (*d*) в азоте при давлении 70 Торг.

промежутка увеличивалось с ростом давления, а время до контрагирования разряда после пробоя промежутка уменьшалось. При давлении выше 600 Торг и напряжении на промежутке 100 кВ промежуток переставал пробиваться, а коаксиальная линия в течение нескольких десятков микросекунд разряжалась через сопротивление омического делителя напряжения.

Амплитуда тока пучка электронов, измеряемая коллектором, была наибольшей при минимальном исследованном давлении 10 Торг. Колебания тока после первого пика на осциллограмме, снятой с коллектора, обусловлены проникновением плазмы из разрядного промежутка за сетку. Эти колебания имеют период, совпадающий с периодом колебаний тока разряда. Отметим, что измеряемая амплитуда тока пучка из-за недостаточного разрешения системы регистрации и тока разряда с коллектора на сетку через плазму, созданную электронным пучком, была значительно меньше реальной. Точные измерения амплитуды тока пучка в этих условиях очень

сложны и в данной работе не проводились. Отметим, что наиболее корректно амплитуду тока пучка можно оценить при измерении его коллектором малого размера, который перемещался по всей площади фольги [42]. При увеличении давления азота до 70 Торг амплитуда тока пучка электронов уменьшалась в ~ 10 раз (рис. 4, *c*). Пробой газоразрядного промежутка происходил при давлении 70 Торг также на фронте импульса напряжения. Проникновение плазмы в промежуток сетка–коллектор с увеличением давления замедлялось, и амплитуда колебаний тока разряда с коллектора после первого пучка уменьшалась (рис. 4, *c*). При дальнейшем повышении давления регистрируемая амплитуда импульса тока пучка продолжала уменьшаться. Однако была замечена интересная особенность формирования пучка электронов при наличии запаздывания пробоя в десятки наносекунд. В этих условиях наблюдались два импульса тока пучка. Первый, большей амплитуды, на переднем фронте импульса напряжения, а второй — на фронте импульса тока разряда.

Для осуществления пробоя в азоте и аргоне при более высоких давлениях зарядное напряжение U_0 было увеличено, это позволило увеличить напряжение U на разрядном промежутке при атмосферном давлении аргона и азота до ~ 160 кВ. На рис. 6 показана зависимость пробивного напряжения от давления аргона (*a*) и

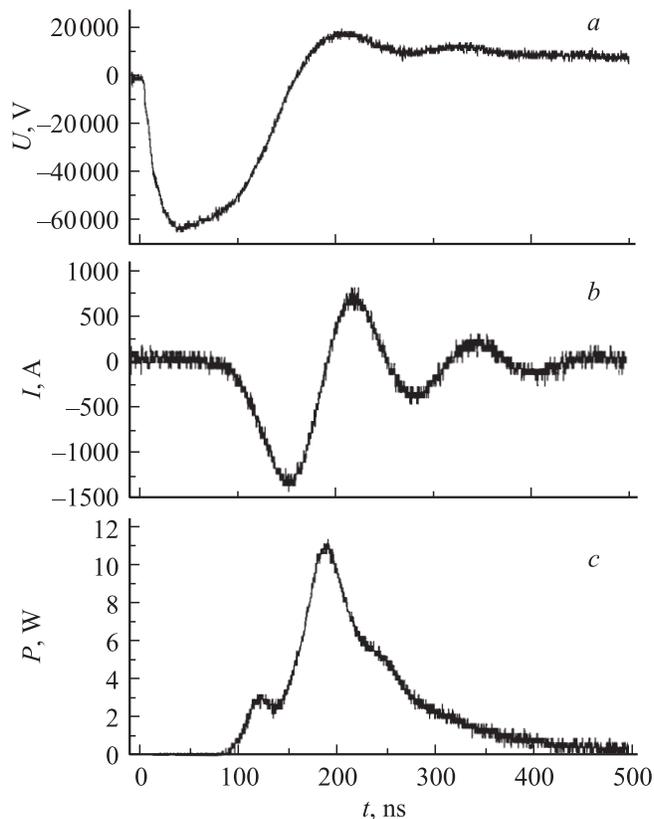


Рис. 5. Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке (*a*), тока разряда (*b*), и импульса излучения разряда (*c*) в азоте при давлении 300 Торг.

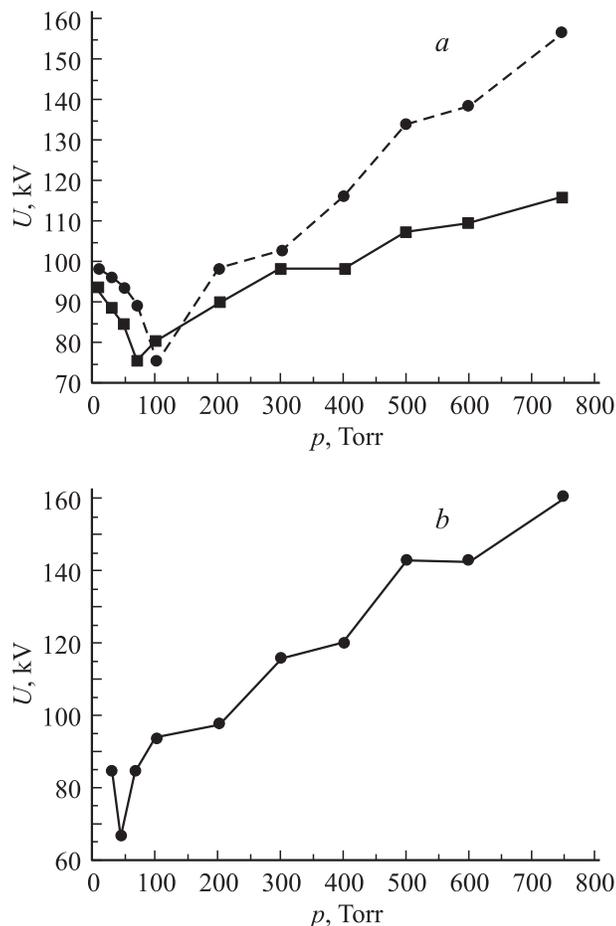


Рис. 6. Зависимость пробивного напряжения от давления аргона (*a*) и азота (*b*) при различных значениях разрядного промежутка (*a* — ■ — 3.5, ● — 4.5; *b* — ● — 2.5 см).

азота (*b*) при различных давлениях и зазорах разрядного промежутка. Пробой промежутка в этих условиях наблюдался при всех давлениях азота и аргона на фронте импульса напряжения. При увеличении давления азота от 10 до 70 Торр, так же как при напряжении холостого хода генератора 100 кВ, в промежутке наблюдалось однородное свечение и происходил рост импульсной мощности излучения второй положительной системы азота (рис. 7). Далее с ростом давления от 70 до 400 Торр импульсная мощность излучения второй положительной системы азота уменьшалась (рис. 7). При этом с крайних колец катода начинали образовываться конусообразные диффузные струи, а в центре промежутка увеличивалась интенсивность излучения искрового канала (рис. 8). При давлении выше 400 Торр мощность излучения искрового канала была значительно больше, чем мощность излучения второй положительной системы азота из объемного разряда. В аргоне падение импульсной мощности излучения в видимой и УФ-области спектра наблюдалось при величине разрядного промежутка 4.5 см с давления 100 Торр. Минимальные напряжения пробоя разрядного промежутка при повышенном напряжении

генератора наблюдались при давлениях азота и аргона 50–100 Торр (рис. 6).

На рис. 9, *a* показан график длительности импульса излучения в зависимости от давления азота в рабочей камере. В области давлений азота 10–100 Торр происходило резкое падение длительности импульса излучения, затем скорость спада замедлялась. Аналогичная картина наблюдалась в аргоне при величине разрядного промежутка 4.5 см. Однако при разрядном промежутке 3.5 см формирование искрового канала и его излучение проявляется при давлении 50 Торр. Это приводило к увеличению длительности импульса излучения в аргоне с ростом давления.

На рис. 9, *b* показана зависимость величины тока пучка электронов от рабочего давления азота и аргона. Токи пучка при давлениях более 100 Торр из-за их малой регистрируемой амплитуды не показаны, но используемый коллектор позволил выделить ток пучка на фоне электромагнитных наводок и при давлении азота 1 атм. Максимальные амплитуды, так же как и

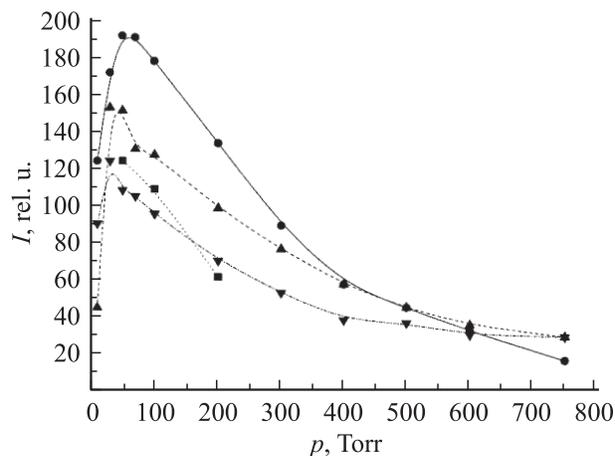


Рис. 7. Зависимость импульсной мощности излучения разряда в азоте от давления при различных значениях разрядного промежутка (▼ — 2.5, ▲ — 3.5, ● — 4.5, ■ — 5 см).

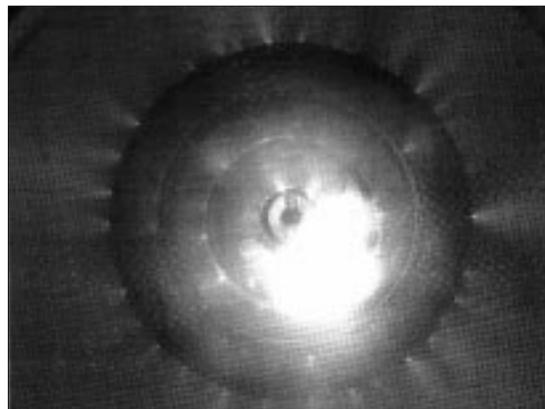


Рис. 8. Фотография разряда в азоте при давлении 70 Торр. Размер межэлектродного расстояния $d = 4.5$ см.

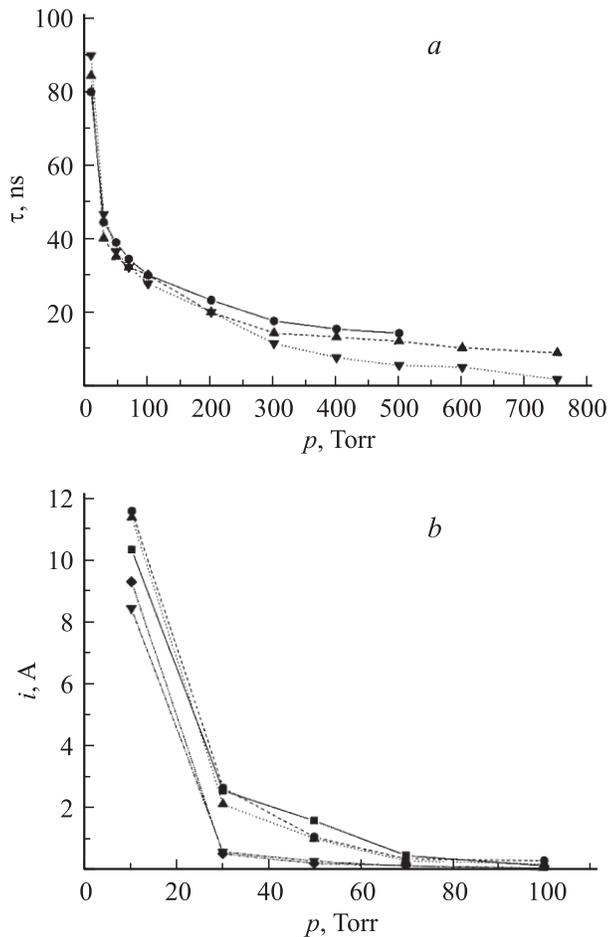


Рис. 9. *a* — зависимость, длительности импульса излучения разряда в азоте от давления при различных величинах межэлектродного расстояния (● — 4.5, ▲ — 3.5, ▼ — 2.5 см); *b* — зависимость величины тока пучка электронов от давления рабочих газов (■ — 2.5, ● — 3.5, ▲ — 4.5 см N₂, ▼ — 3.5, ◆ — 4.5 см Ar).

при напряжении генератора 100 кВ, регистрировались при давлении азота 10 Торр. С увеличением давления амплитуда тока пучка уменьшалась, хотя время запаздывания пробоя промежутка и напряжение на промежутке перед пробоем увеличивались. Отметим две важные особенности генерируемого при различных давлениях пучка электронов. Минимальные длительности импульса тока пучка на полувысоте регистрировались в области давлений 30–200 Торр и составили ~ 1.5 ns на полувысоте, что соответствует предельному разрешению используемой системы регистрации. Однако как при увеличении давления азота (300 Торр и более), так и при его уменьшении до 10 Торр длительность импульса тока пучка увеличивалась. При давлении 10 Торр она составила ~ 3 ns на полувысоте, а в диапазоне давлений 600–760 Торр увеличивалась до ~ 4.5 ns. Причем во втором случае импульс тока состоял из нескольких пиков примерно равной длительности. Отметим еще раз, что в данных экспериментах разрешение системы регистрации

составляло ~ 1.5 ns и использовался коллектор большого размера. Это позволило зарегистрировать увеличение длительности тока пучка с уменьшением E_0/p при больших давлениях, а также при давлении азота 10 Торр, но не было достаточно, чтобы регистрировать минимальные длительности тока пучка, которые в работах [29–33] составили ~ 100 ps.

Оценки полезно вложенной энергии в плазму разряда в азоте дали ее величину ~ 1 J. При этом максимальный КПД излучения второй положительной системы азота по энергии составил $\sim 0.3\%$. Эта эффективность более чем на порядок больше, чем была получена при оптимальных давлениях в работах [40,41], в которых использовались генераторы с длительностью импульса напряжения в несколько наносекунд.

Выводы

Таким образом, исследованы характеристики разряда и излучения в азоте, аргоне при давлении 10–760 Торр и формировании разряда без предыонизации промежутка от дополнительного источника. При $E_0/p \sim 270$ В/см · Торр и давлении азота ~ 70 Торр зарегистрирован максимум на зависимости мощности излучения второй положительной системы азота от давления. Получено увеличение эффективности излучения второй положительной системы азота по сравнению с работами [40,41]. Зарегистрировано отличие в зависимости мощности излучения второй положительной системы азота от давления в данных экспериментах и в работе [41], где использовался генератор с длительностью импульса напряжения в единицы наносекунд.

Установлены следующие особенности формирования пучка убегающих электронов в данных условиях.

1. Пучок электронов в широком диапазоне условий генерировался на фронте импульса напряжения, в том числе в отсутствие заметного спада напряжения на промежутке в течение сотен наносекунд.

2. При запаздывании пробоя промежутка в десятки наносекунд пучок электронов генерировался как на фронте импульса напряжения, так и при пробое промежутка. Амплитуда тока пучка на фронте импульса напряжения в исследованных условиях больше, чем при спаде напряжения на промежутке.

3. При уменьшении с ростом давления параметра E_0/p (до ~ 46 В/см · Торр) длительность импульса тока пучка увеличивалась и регистрировалось несколько пиков с общей длительностью ~ 4.5 ns на полувысоте. При минимальном исследованном давлении 10 Торр также наблюдалось увеличение длительности импульса тока пучка до ~ 3 ns на полувысоте.

Механизм формирования электронных пучков и объемных разрядов в неоднородном электрическом поле обсуждался ранее в работах [22–29,31–37,41,42].

Работа выполнена при поддержке программы „Фундаментальные проблемы нано- и пикосекундной электроники большой мощности“.

Список литературы

- [1] Эксимерные лазеры / Под ред. Ч. Роудз. М.: Мир, 1981. 247 с.
- [2] Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электро-разрядные эксиплексные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
- [3] Газовые лазеры / Под ред. И. Мак-Даниэль, У. Ниген. М.: Мир, 1986. 552 с.
- [4] Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. Pulsed gas lasers. Washington: SPIE PRESS, 1995. 374 с.
- [5] Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Янкевич Е.Б. // ПТЭ. 1992. Вып. 4. С. 244–245.
- [6] Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 5. С. 1–5.
- [7] Rachenko A.N., Tarasenko V.F., Belokurov A.N., Mendozha P. // Physica Scripta. 2006. Vol. 74. P. 108–113.
- [8] Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 2. С. 169–173.
- [9] Palmer A.I. // Appl. Phys. Lett. 1974. Vol. 25. N 3. P. 138–140.
- [10] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [11] Осипов В.В. // УФН. 2000. Т. 170. Вып. 3. С. 225–245.
- [12] Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 4746–4748.
- [13] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 8. С. 1530–1533.
- [14] Кремнев В.В., Курбатов Ю.А. // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып.4. С.795–799.
- [15] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
- [16] Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карелин В.И., Никольский В.С. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 3. С. 601–604.
- [17] Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Павловский А.И., Репин П.Б. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 7. С. 891–893.
- [18] Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 18. С. 74–80.
- [19] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 49–82.
- [20] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–289.
- [21] Гуревич А.В., Зыбин К.П. // УФН. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177–1199.
- [22] Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. // ДАН. 2004. Т. 398. № 5. С. 611–614.
- [23] Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M. // Laser and Particle Beams. 2004. Vol. 22. N 1. P. 75–82.
- [24] Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Костыря И.Д., Орловский В.М. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 69–74.
- [25] Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953–971.
- [26] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Physica scripta. 2005. Vol. 72. N 1. P. 41–67.
- [27] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Plasma Devices and Operations. 2005. Vol. 13. N 4. P. 231–279.
- [28] Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д. // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 12. С. 40–51.
- [29] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. N 4. P. 545–551.
- [30] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шнак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 35–44.
- [31] Tarasenko V.F. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. N 8. P. 1501(1–3).
- [32] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I., Shunailov S.A., Kostyrya I.D., and Tkachev A.N. // Laser physics. 2006. Vol. 16. N 3. P. 526–533.
- [33] Андреев Ю.А., Костыря И.Д., Кошелев В.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 105–111.
- [34] Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M. // Laser and Particle Beams. 2004. Vol. 22. N 1. P. 75–82.
- [35] Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 11. С. 19–26.
- [36] Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев Ф.Н., Яковленко С.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 65–69.
- [37] Бакихт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
- [38] Репин П.Б., Репьев А.Г. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 7. С. 33–37.
- [39] Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987. 226 с.
- [40] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. // ПТЭ. 1977. № 1. С. 203–205.
- [41] Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 8. С. 35–40.
- [42] Бакихт Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И., Куркан И.К., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2007. № 5. С. 111–114.