

Объемный импульсный разряд в неоднородном электрическом поле при высоком давлении и коротком фронте импульса напряжения

С.Б.Алексеев, В.П.Губанов, И.Д.Костыря, В.М.Орловский, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко

Показано, что в неоднородном электрическом поле при коротком фронте импульса напряжения и наносекундной длительности импульса без дополнительного источника предьонизации в различных газах и при давлениях выше атмосферного (гелий – 6 атм, азот – 3 атм) формируется объемный разряд. В смеси Ar–Xe при давлении 1.2 атм и активной длине 1.5 см получена генерация на атомарных переходах ксенона. В объемной стадии разряда реализованы рекордные удельные мощности энерговывода (при давлении 1 атм в воздухе более 0.8 ГВт/см³). Формирование объемного разряда обусловлено предьонизацией промежутка быстрыми электронами, которые ускоряются за счет усиления электрического поля в прикатодной области и в промежутке. Объемный разряд в неоднородном электрическом поле реализован при квазистационарном напряжении на промежутке от 10 до 180 кВ, частоте следования импульсов до 160 Гц и различных геометриях разрядного промежутка.

Ключевые слова: объемный разряд, большой энерговыход, электроразрядные лазеры.

1. Введение

Объемные разряды в молекулярных и атомарных газах, а также в их смесях, в настоящее время широко используются в различных областях науки и техники, например при создании импульсных лазеров на плотных газах [1, 2]. Для формирования объемного импульсного разряда при повышенном давлении обычно применяют предварительную ионизацию разрядного промежутка от различных источников ионизирующего излучения [1–3] или уменьшают давление газа в промежутке [4]. Известно также, что возможно получить диффузный разряд в неоднородном электрическом поле без предварительной ионизации газа. Наиболее распространенный тип такого разряда – это импульсная корона [5]. Импульсная корона широко применяется для предьонизации основного разряда в импульсных электроразрядных лазерах (эксиплексных [6], CO₂ [7] и других). Объемный разряд без предварительной ионизации при давлении десятки торр реализован в электроотрицательных газах [8].

При наносекундных длительностях импульсов напряжения с крутым передним фронтом (единицы или доли наносекунд) удается существенно увеличить удельную мощность энерговыклада в объемном разряде без предьонизации (до 100 МВт/см³) [9, 10]. В [11–15] было показано, что при определенных условиях в промежутке с неоднородным электрическим полем, при атмосферном давлении воздуха и других газов формируется субнаносекундный электронный пучок с амплитудой тока в десятки ампер (в воздухе до 170 А [13]) и объемный разряд с высокой удельной мощностью энерговывода (в воздухе до 400 МВт/см³ [11]). Однако область параметров, при ко-

торых можно реализовать объемный импульсный разряд без дополнительной ионизации промежутка, а также причины формирования разряда были малоизучены. Более того, было неясно, почему разряд остается объемным при наличии ярких катодных пятен на потенциальном электроде.

Целью данной работы является исследование причин формирования объемного импульсного разряда в неоднородном электрическом поле без предварительной ионизации промежутка при повышенном давлении, определение области его существования, а также исследование возможности использования данного типа разряда для получения генерации в азоте и ксеноне.

2. Экспериментальные установки и методики

При проведении работы использовались четыре генератора наносекундных импульсов с различными газовыми диодами и с длительностью фронта импульса напряжения от 0.3 до 15 нс. Разрядный промежуток был образован плоским анодом и катодом сравнительно малого размера, что обеспечивало дополнительное усиление электрического поля у катода. Генератор 1 (РАДАН-220) имел волновое сопротивление накопительной линии 20 Ом и формировал на разрядном промежутке импульс напряжения с амплитудой ~220 кВ. Расстояние между катодом и анодом изменялось от 8 до 18 мм. Использовался катод (катод № 1) из стальной трубки диаметром 6 мм и с толщиной стенки 50 мкм.

В генератор 2 (СИНУС) была встроена дополнительная передающая линия с волновым сопротивлением 40 Ом. Это позволило повысить давление в газовом диоде до 6 атм. Генератор формировал на согласованной нагрузке 40 Ом импульс с напряжением ~180 кВ. Катод № 2 представлял собой набор трех цилиндров (диаметры 12, 22, 30 мм) из титановой фольги толщиной 50 мкм, вставленных друг в друга. Зазор газового промежутка изменялся от 10 до 28 мм.

С.Б.Алексеев, В.П.Губанов, И.Д.Костыря, В.М.Орловский, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 4; e-mail: vft@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 25 марта 2004 г., после доработки – 3 августа 2004 г.

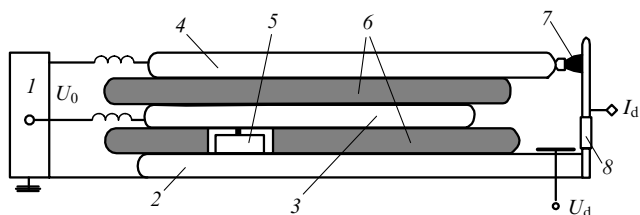


Рис. 1. Схема генератора 3: 1 – источник импульсного напряжения; 2–4 – электроды; 5 – разрядник; 6 – изолятор; 7 – разрядный промежуток; 8 – шунт; I_d – ток разряда; U_d – напряжение на разряде.

Генератор 3 (конструкция показана на рис.1) формировал на разрядном промежутке импульс напряжения с амплитудой 10–30 кВ и длительностью на полувывсоте ~ 1.5 нс. В данном генераторе использовалась двойная полосковая линия и газовый разрядник, давление азота в котором при заданной скорости нарастания напряжения определяло напряжение его пробоя. Отрицательное импульсное напряжение подавалось на четыре катода типа № 1, включенных параллельно. Для зарядки полосковых линий генератора использовались поочередно два импульсных источника, позволяющие изменять зарядное напряжение полосковых линий и частоту повторения импульсов (до 160 Гц).

В генераторе 4 применялся индуктивный накопитель энергии с прерывателем тока на основе SOS-диодов, которые устанавливались параллельно нагрузке [14]. Генератор 4 формировал на разрядном промежутке импульсы напряжения с амплитудой ~ 50 кВ и длительностью на полувывсоте ~ 15 нс, при фронте импульса напряжения 7–15 нс. Отрицательное импульсное напряжение подавалось на катод № 1 или на катод № 3, выполненный из лезвия длиной 8 см с закругленными краями.

В ряде экспериментов разрядный промежуток помещался в газовую камеру с зеркалами (генератор 1), что позволяло обеспечить откачку газа и изменять состав и давление газов в промежутке.

Для регистрации сигналов с емкостных делителей и шунтов применялся осциллограф TDS-684B с полосой 1 ГГц, имеющий 5 точек на 1 нс (5 GS/s), или осциллограф TDS-334 с полосой 0.3 ГГц, имеющий 2.5 точки на 1 нс (2.5 GS/s). Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом. Лазерное излучение в ИК диапазоне регистрировалось приемником ФСГ-22, охлаждаемым жидким азотом, а в УФ диапазоне – фотодиодом ФЭК-22.

3. Результаты измерений

При подаче наносекундных импульсов напряжения с коротким фронтом на промежуток без его предварительной ионизации был получен объемный разряд в различных экспериментальных условиях. Так, при атмосферном давлении воздуха объемный разряд формировался на всех четырех генераторах. Длительность фронта импульса напряжения при этом изменялась от 0.3 до 15 нс. При сокращении длительности фронта импульса напряжения максимальное давление, при котором формировался объемный разряд, увеличивалось.

На рис.2 показаны фотографии разряда в гелии при давлениях 1 и 6 атм, а также в азоте при давлениях 1 и 3 атм. В азоте при давлении 3 атм уже заметны прорастающие искровые каналы, однако в гелии разряд оставался

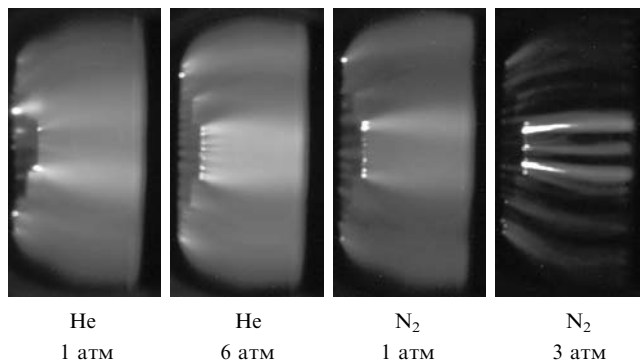


Рис.2. Фотографии свечения разряда в гелии и азоте, полученные на генераторе 1 при напряжении холостого хода 360 кВ.

объемным и при давлении 6 атм. Объемный разряд легче всего получить в неоднородном электрическом поле при катоде с малым радиусом кривизны. Отметим, что если имеются яркие катодные пятна, объемный разряд может формироваться при увеличенном радиусе кривизны катода. На генераторах 1 и 2 имелась возможность заполнения разрядного промежутка различными газами, и объемный разряд был получен при атмосферном давлении в азоте, криптоне, аргоне, неоне, гелии и в смесях Ar–N₂, Ar–Xe, CO₂–N₂–He, He–Ne–Ar. Область свечения объемного разряда обычно имела форму усеченного конуса или нескольких конусов (струй). Таким образом, объемный разряд формировался без источника предварительной ионизации и при наличии ярких пятен на катоде. Данный тип разряда в [11] предложено назвать ОРИПЭЛ (ОРИПЭЛ – объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин). Этот режим объемного импульсного разряда, как будет показано ниже, отличается от традиционного коронного разряда [5] высокими удельными мощностями возбуждения (~ 100 МВт/см³ и выше), в том числе и в прианодной области, а также сравнительно однородным свечением плазмы по длине разрядного промежутка. Кроме того, в ОРИПЭЛ напряжение на промежутке выходит на квазистационарную стадию без «допробойного» пика перенапряжения, при этом осциллограмма импульса тока разряда практически повторяет осциллограмму импульса напряжения на промежутке. С точки зрения физических процессов, на формирование ОРИПЭЛ существенное влияние оказывают движение волны ионизации и усиление при этом электрического поля в промежутке.

На рис.3 приведены осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда, снятые с разрешением ~ 1 нс, и импульса напряжения на промежутке, снятого при разрешении ~ 0.3 нс. Во втором случае была специально увеличена длительность импульса напряжения (РАДАН-303). Импульс тока имеет небольшое запаздывание и практически повторяет форму импульса напряжения, а на последнем отсутствует первый «допробойный» пик перенапряжения, амплитуда которого в обычных условиях пре-

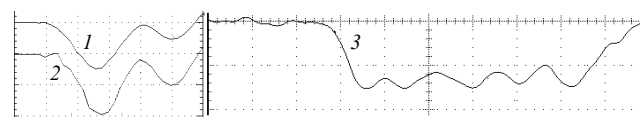


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на промежутке (1,3) и разрядного тока (2). Зазор 8 мм, масштаб напряжения – 66 кВ на одну клетку (кл.) осциллограммы (1) и 45 кВ/кл. (3), тока – 3 кА/кл. (2), времени – 1 нс/кл.

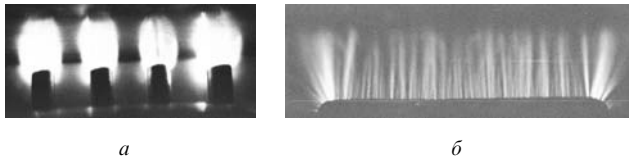


Рис.4. Фотографии свечения разряда в воздухе при атмосферном давлении: частота следования импульсов 160 Гц, генератор 3 (а) и однократный импульс, генератор 4 (б).

вышает напряжение в квазистационарной стадии объемного разряда [2]. Подобные осциллограммы импульсов напряжения реализуются только при интенсивной пред-ионизации разрядного промежутка. Максимальная величина параметра E/p (E – напряженность электрического поля, p – давление газа) в азоте при атмосферном давлении не превышала $\sim 0.08 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{Тор}^{-1}$.

Важная особенность ОРИПЭЛ – это его формирование при различных начальных напряжениях генератора. Так, при атмосферном давлении воздуха и различных длинах разрядного промежутка напряжение холостого хода генераторов изменялось от 20 кВ (генератор 3) до 360 кВ (генератор 2). Напряжение на промежутке в квазистационарной стадии разряда зависело от межэлектродного зазора, сорта и давления газа, а также конструкции катода. Причем для каждого из генераторов был реализован согласованный режим, в котором сопротивление газоразрядной плазмы равнялось сопротивлению генератора. Это обеспечивало мощность ввода энергии в газоразрядную плазму на генераторе 1 при атмосферном давлении воздуха и межэлектродном зазоре 8 мм более $0.8 \text{ ГВт}/\text{см}^3$.

На рис.4,а показана фотография свечения объемного разряда, полученная при давлении воздуха в промежутке 1 атм и работе генератора 3 в импульсно-периодическом режиме. Объемный характер разряда сохранялся и при частоте следования импульсов 160 Гц. На рис.4,б приведена фотография свечения разрядного промежутка с зазором 30 мм и с катодом № 3. Разряд с генератором 4 (индуктивный накопитель энергии) при фронте импульса напряжения $\sim 10 \text{ нс}$ также оставался объемным и состоял из множества диффузных струй.

На генераторе 1 были проведены эксперименты по получению генерации в азоте и на смеси $\text{Ar}-\text{Xe}$. В этих экспериментах межэлектродный зазор составлял 16 мм, а диаметр разрядной области на аноде – 15 мм. Порог генерации в азоте не был достигнут, а в смеси $\text{Ar}-\text{Xe}$ была получена стабильная генерация на атомарных переходах ксенона в ближней ИК области спектра. Осциллограммы импульсов тока разряда и лазерного излучения приведены на рис.5. Отражение зеркал на длине волны 1.73 мкм составило 99 % и 98 % соответственно, пропускание выходного зеркала было $\sim 2 \%$.

4. Обсуждение результатов

Возникает вопрос, почему в промежутке с неоднородным электрическим полем при высоких давлениях различных газов и наличии катодных пятен формируется объемный разряд? Мы считаем, что в данных условиях наблюдается следующая динамика развития пробоя в газовом диоде.

Во-первых, при формировании разряда важную роль играет усиление электрического поля на катоде, который

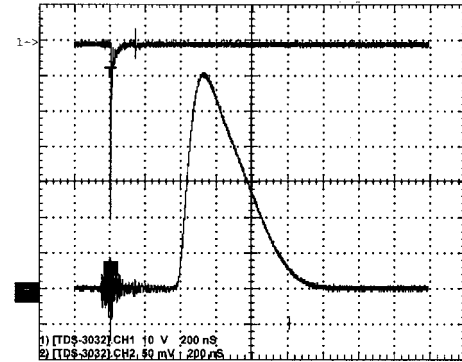


Рис.5. Осциллограммы тока разряда (верхний луч) и лазерного излучения (нижний луч) в смеси $\text{Ar}:\text{Xe} = 240:1$ при давлении $\sim 1.2 \text{ атм}$. Масштаб времени 200 нс/кл.

имеет острые кромки. При подаче высоковольтного импульса напряжения на промежуток, как показали расчеты по программе SAM, электрическое поле усиливается у катода на несколько порядков. На фронте импульса напряжения электрическое поле становится достаточным для автоэлектронной эмиссии электронов, которая может усиливаться за счет положительного заряда ионов, а затем для взрывной эмиссии электронов и образования катодных пятен. Эти пятна хорошо видны на всех фотографиях (см. рис.2 и рис.4). На рис.6 показано свечение промежутка при использовании срезающего разрядника с зазором, в 1.6 раз меньшим, чем зазор основного промежутка. Срезающий разрядник срабатывает за время короче 1 нс, но на катоде видны яркие пятна размером менее 0.2 мм.

Усиление электрического поля на границе плотной плазмы катодных пятен при коротком фронте импульса напряжения приводит к появлению быстрых электронов с энергией большей, чем энергия, соответствующая максимуму потерь при ионизации. Быстрые электроны, ускоренные в прикатодной области до энергии $\sim 1 \text{ кэВ}$ и более, осуществляют пред-ионизацию прикатодной области. Начальные электроны согласно таунсендовскому механизму инициируют развитие электронных лавин. Концентрация начальных электронов достаточна для образования такого количества лавин, что они перекрываются до достижения критической концентрации электронов

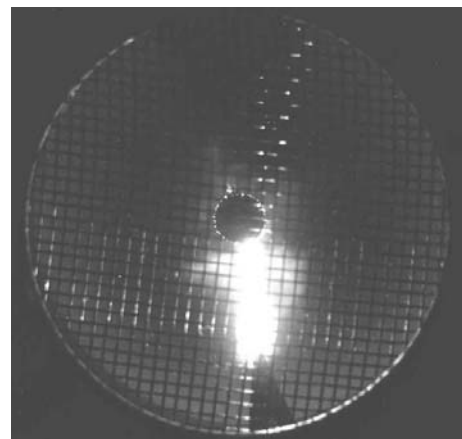


Рис.6. Фотография свечения разряда в воздухе при атмосферном давлении. Однократный импульс на генераторе 1 при установке срезающего разрядника (анод внизу) и съемке катода (в центре) с торца через сетку (размер ячейки сетки 1.2 мм).

в каждой лавине. Таким образом, в области, прилегающей к катоду и катодным пятнам, формируется объемный разряд. Однако электроны с энергией ~ 1 кэВ при атмосферном давлении воздуха потеряют свою энергию на расстоянии в доли миллиметра [15], поэтому должен быть механизм компенсации потерь энергии быстрых электронов (~ 1 кэВ) при движении в газе. Один из возможных механизмов – это усиление электрического поля у острия высокопроводящего канала (стримера), который «закорачивает» промежуток [16]. Однако в промежутке формируется объемный разряд (см. рис.2 и рис.4), что приводит к существенному уменьшению электрического поля на границе расширяющейся плазмы.

Известно, что при лавинном размножении электронов и их дрейфе к аноду на границе расширяющейся плазмы возникает избыточный отрицательный заряд. При этом часть электронов на границе расширяющейся плазмы ускоряется как за счет положительного напряжения на аноде, так и за счет выталкивания из электронного облака. По-видимому, в ОРИПЭЛ из-за короткого фронта импульса напряжения (~ 1 нс и менее) выталкивание части электронов из области отрицательного разряда на фронте волны ионизации приводит к появлению быстрых электронов, которые ионизуют прилегающие к расширяющейся плазме области. Таким образом можно объяснить движение фронта плотной плазмы со скоростью $\sim 10^9$ см/с и формирование объемного разряда в промежутке в виде струй. Отметим, что в [17] теоретически было показано, что начиная с некоторых, достаточно больших, напряженностей электрических полей, вытеснение поля на фронте стримера вследствие его поляризации осуществляется за время порядка времени движения убегающих электронов вблизи его фронта. В результате может реализоваться синхронное движение области усиливающего краевого поля и ускоряющихся электронов. Из наших экспериментов следует, что при сокращении фронта импульса напряжения увеличивается давление, при котором формируется объемный разряд. Также отметим, что при увеличении длительности фронта импульса напряжения, когда скорость распространения плазмы уменьшается, формирование объемного разряда при повышенных давлениях может быть связано с усилением поля на катодной области с ионизацией прикатодной области быстрыми электронами. Это приводит к формированию в прикатодной области объемного разряда, который является плазменным катодом [18].

Отсутствие генерации на второй положительной системе азота при возбуждении ОРИПЭЛ по сравнению с возбуждением объемным импульсным разрядом с высоким начальным напряжением на промежутке обусловлено более низкими максимальными значениями параметра E/p (менее 0.08 кВ·см $^{-1}$ ·Тор $^{-1}$), тогда как для эффективного возбуждения второй положительной системы азота нужны $E/p = 0.1 - 0.2$ кВ·см $^{-1}$ ·Тор $^{-1}$ [2, 19]. С другой стороны, электронная температура, которая реализуется в ОРИПЭЛ, может оказаться оптимальной для ряда импульсных лазеров на плотных газах и источников спонтанного излучения. В частности, как мы уже отмечали выше, на атомарных переходах ксенона была получена стабильная генерация при малой длине активной области (не более 15 мм).

5. Выводы

Проведенные исследования показали, что при наносекундном фронте импульса напряжения в неоднородном электрическом поле без дополнительного источника предыонизации в различных газах при давлениях выше атмосферного (гелий – 6 атм, азот – 3 атм) формируется объемный разряд. Его формирование обусловлено предыонизацией промежутка быстрыми электронами, которые ускоряются в результате усиления электрического поля. В прикатодной области это происходит за счет геометрического фактора, а в промежутке – за счет выталкивания электронов отрицательным зарядом на фронте расширяющейся плазмы. В воздухе при давлении 1 атм получена удельная мощность энерговода более 0.8 ГВт/см 3 . Объемный разряд в неоднородном электрическом поле реализован при атмосферном давлении воздуха, напряжении на промежутке от 10 до 180 кВ и частоте следования импульсов до 160 Гц. При возбуждении ОРИПЭЛ в смеси Ag–Xe при давлении 1.2 атм и активной длине 1.5 см получена генерация на атомарных переходах ксенона.

Мы полагаем, что ОРИПЭЛ, формируемые без источника дополнительной предыонизации при высоких давлениях различных газов и их смесей, найдут в будущем широкое применение. Данные разряды можно будет использовать для возбуждения импульсных лазеров на плотных газах и в различных технологических процессах.

Авторы благодарят С.Д.Коровина за поддержку данной работы, А.В.Феденева за помощь в экспериментах и С.И.Яковленко за полезные дискуссии.

1. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
2. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed gas lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
3. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. *Физика импульсного пробоя газов* (М.: Наука, 1991).
4. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М.: Наука, 1992).
5. Yankelevich Y., Pokryvailo A. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **30**, 1975 (2002).
6. Тарасенко В.Ф., Тельнов В.А., Федоров А.И. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 6, 91 (1979).
7. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Павловский А.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **18**, 891 (1991).
8. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сейфуллин А.В., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
9. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. *ПТЭ*, № 1, 203 (1977).
10. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. *УФН*, **160** (7), 49 (1990).
11. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 3, 94 (2003).
12. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М., Ткачев А.Н., Шунайлов С.А. *Письма в ЖЭТФ*, **77**, 737 (2003).
13. Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M. *Laser Part. Beam.*, **22**, 75 (2004).
14. Тарасенко В.Ф., Алексеев С.Б., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 2, 96 (2004).
15. Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Письма в ЖТФ*, **30** (10), 31 (2004).
16. Козырев А.В., Королев Ю.Д. *ЖТФ*, **51**, 2210 (1981).
17. Аскарьян Г.А. *Труды ФИАН*, **66**, 66 (1973).
18. Arnold E., Lomaev M.I., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Tkachev A.N., Shitts D.V., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **12**, 1227 (2002).
19. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31**, 489 (2001).