

03;04;07;12

Усиление электрического поля в промежутке при пробое волнами ионизации азота повышенного давления

© В.Ф. Тарасенко, А.Е. Тельминов, А.Г. Бураченко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2010 г.

Исследован пробой промежутков в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях азота и других газов. На электроды в виде лезвий подавались наносекундные импульсы высокого напряжения. Установлено, что пробой промежутка осуществляется диффузными струями, которые распространяются навстречу с обоих электродов. Показано, что при сближении встречных струй происходит их перемыкание, в том числе под углом к силовым линиям электрического поля. С помощью генерации на $\lambda = 337.1 \text{ nm}$ азота показано, что при повышенных давлениях азота в области пробоя между встречными струями электрическое поле усиливается. Установлено, что интенсивность свечения плазмы разряда в области пробоя между катодонаправленными и анодонаправленными струями меньше, чем в остальной части промежутка.

Исследования различных типов разрядов постоянно привлекают внимание исследователей, см. монографии [1,2] и ссылки в них. В последние годы возрос интерес к изучению импульсных диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях воздуха и других газов [3–7]. Диффузный характер разряда в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях различных газов достигается за счет генерации пучков убегających электронов и рентгеновского излучения, см., например, обзор [8] и ссылки в нем. Изучение разрядов в неоднородном электрическом поле представляют как научный [1–8], так и практический интерес [1,2,9,10]. Однако особенности формирования наносекундных и субнаносекундных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях остаются малоизученными. Это, в частности, обусловлено сложностью и высокой скоростью процессов, протекающих в промежутке при наносекундном фронте импульса напряжения. Например, в работах [11, 12]

были зарегистрированы скорости фронта волны ионизации 10–20 cm/ns. Одним из вопросов, который принципиально важен для установления механизма генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП [12]) при повышенных давлениях газа в газовом диоде, является экспериментальное доказательство существования перед фронтом волны ионизации области с усиленным электрическим полем. В работах [7,12,13] предполагается, что ускорение основного числа электронов в газовом диоде при повышенных давлениях происходит в области между фронтом волны ионизации и анодом. В работе [14] механизм ускорения электронов за счет усиления электрического поля на фронте волне ионизации отрицается. Согласно [14], граница плотной плазмы за счет предварительной ионизации промежутка быстрыми электронами размывается, и электрическое поле на фронте волны ионизации не влияет на генерацию пучка убегающих электронов.

Цель данной работы — получить экспериментальное доказательство усиления электрического поля перед фронтом волны ионизации при давлении газа.

Для выявления областей разрядного промежутка с усиленным электрическим полем использовалось лазерное излучение на второй положительной системе азота с $\lambda = 337.1$ nm. Генерация на этой длине волны возможна только при высоких значениях параметра E/p , где E — напряженность электрического поля, p — давление азота [15]. Высокие E/p (> 100 V/(cm · Torr)) достигаются при повышенных давлениях (правая ветвь кривой Пашена) только при коротком фронте импульса напряжения. В этих условиях амплитуда напряжения достигает максимума, а затем при пробое промежутка E/p быстро (доли-единицы наносекунд) уменьшается за счет лавинного размножения электронов. В квазистационарной стадии объемного (диффузного) разряда, которая наступает после быстрого спада напряжения на промежутке, значение параметра E/p сравнительно мало (~ 40 V/(cm · Torr)) и УФ-генерация в азоте прекращается. Если пробой промежутка наступает при низких E/p (< 80 V/(cm · Torr)), порог генерации в азоте не достигается даже в стадии быстрого спада напряжения. Отметим, что в работе [16] при низких давлениях ксенона и субмикросекундном временном разрешении усиление электрического поля при движении волны ионизации в промежутке было зарегистрировано с помощью эффекта Штарка. Эксперименты по прямому измерению электрических полей в [16] проводились с использованием двух лазеров с разными длинами волн и ICCD камеры.

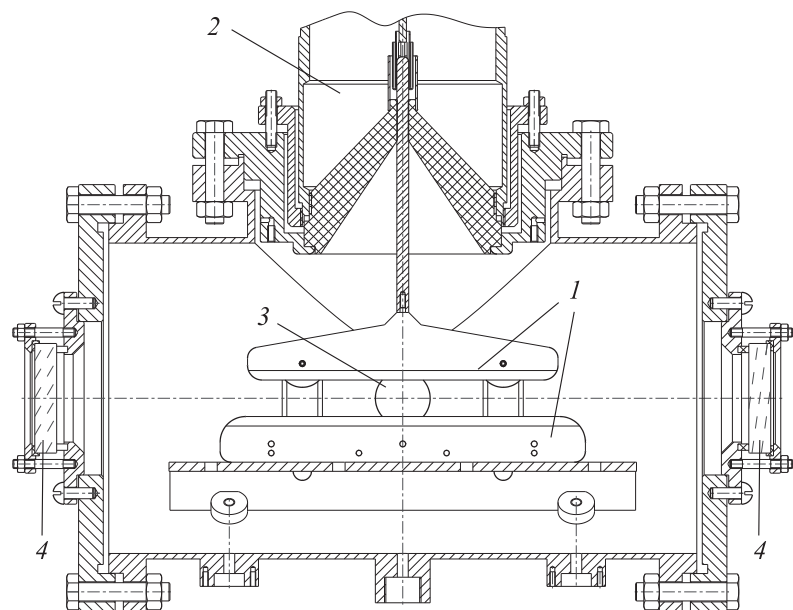


Рис. 1. Конструкция разрядной камеры: 1 — электроды, 2 — выходная часть генератора РАДАН-220, 3 — боковое окно, 4 — зеркала резонатора.

В данных экспериментах использовался промежуток с расстоянием между катодом и анодом 12 или 20 мм. Оба электрода были выполнены в виде лезвий с закругленными краями. Длина разрядной области равнялась 20 см, что позволяло получать УФ-генерацию в азоте. Возбуждение осуществлялось от генератора наносекундных импульсов РАДАН-220, который имел волновое сопротивление накопительной линии 20Ω и формировал на высокоомной нагрузке импульс напряжением с амплитудой ~ 220 кВ. Длительность импульса напряжения при согласованной нагрузке составляла ~ 2 нс, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~ 0.5 нс. Конструкция разрядной камеры приведена на рис. 1. Во всех экспериментах верхний потенциальный электрод был катодом. Камера могла откачиваться и заполняться различными газами. На торцевых стенках разрядной камеры устанавливались зеркала резонатора. Дополнительное окно для

фотографирования разряда располагалось на боковой стенке камеры. Амплитудно-временные характеристики УФ-лазерного излучения регистрировались фотодиодом ФЭК-22СПУ. Область промежутка, из которой шло лазерное излучение, определялась по люминесценции экрана, установленного на выходном зеркале. Для регистрации сигналов с ФЭК-22СПУ, омического и шунта применялся осциллограф TDS-3054В (0.5 GHz, 5 GS/s). Свечение разряда и люминесцентного экрана фотографировалось зеркальным фотоаппаратом Sony A100.

Характеристики разряда и излучения исследовались в азоте, воздухе и смеси неона с водородом при равных парциальных давлениях. Давление в промежутке изменялось от 100 Torr до 3 atm. Во всех газах в широком диапазоне давлений формировался диффузный разряд, состоящий из струй, которые при низких давлениях перекрывались. При использовании двух ножевых электродов диффузные струи начинались с обоих электродов и перекрывались примерно на $1/3$ расстояния от анода. Известно, что при одном электроде с малым радиусом кривизны и втором плоском диффузные струи зарождались на электроде с малым радиусом кривизны и двигались к плоскому электроду. При увеличении давления азота в разрядной камере диаметр диффузных струй уменьшался. Напряжение пробоя промежутка зависело от сорта и давления газа. В азоте, при увеличении давления от 150 Torr до 2 atm, напряжение на промежутке увеличивалось от ~ 65 до ~ 170 kV. На осциллограммах импульса напряжения, как и при формировании импульсного объемного разряда с предыонизацией от дополнительного источника, можно выделить основных три стадии: фронт импульса, стадия быстрого спада напряжения и квазистационарная стадия, длительность которой примерно соответствует в данных условиях длительности импульса от генератора.

При увеличении фронта импульса напряжения диаметр диффузных струй уменьшался, и с электродов начинали прорастать искровые лидеры, длина которых в данных условиях достигала нескольких миллиметров. Однородность разряда в воздухе была хуже, чем в азоте. В воздухе диффузные струи в равных условиях имели меньший диаметр и искровые лидеры начинали прорастать при более низких давлениях. В неоне и водороде, а также в их смесях однородность разряда улучшалась по отношению к воздуху и азоту.

Основной результат данной работы иллюстрирует рис. 2. При малых давлениях в азоте, несмотря на уменьшение напряжения пробоя

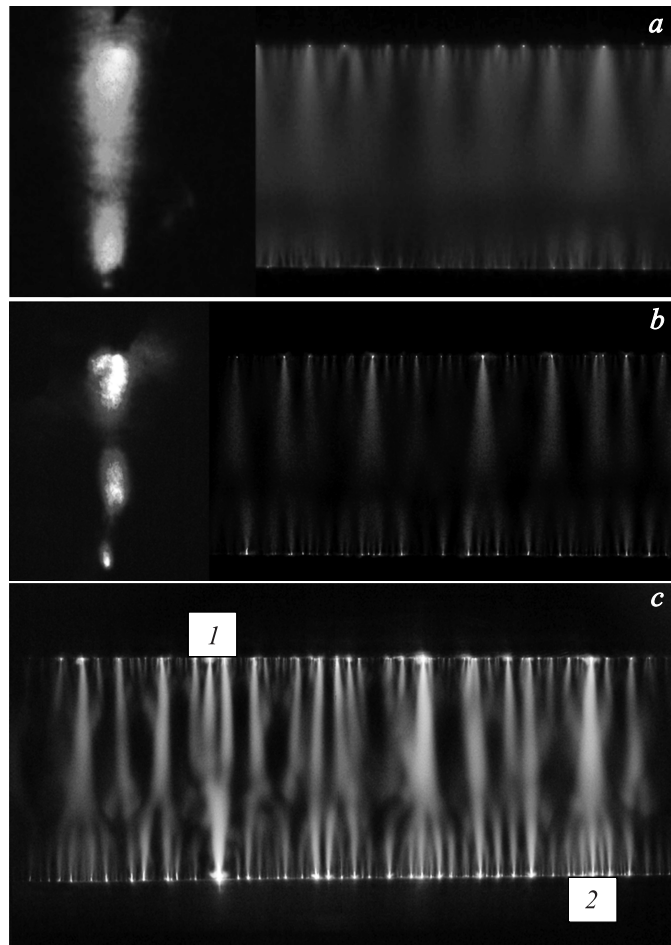


Рис. 2. Интегральные фотографии свечения разряда и генерации (слева на *a*, *b*) при давлении азота 0.2 (*a*) и 2 (*b, c*) atm и максимальном напряжении на промежутке 65 (*a*) и 170 (*b, c*) kV. Межэлектродный зазор 2 см. Фотография (*c*) получена при увеличении чувствительности фотоаппарата.

промежутка, достигались наибольшие значения параметра E/p . Так, при давлении азота 150 Torr средняя величина параметра E/p составила $\sim 210 \text{ V/cm} \cdot \text{Torr}$. При определении E/p из осциллограмм бралось

максимальное значение напряжения на промежутке, и это значение делилось на величину зазора и на давление газа. Как видно из рис. 2, *a*, наибольшая плотность мощности лазерного излучения при низком давлении регистрируется из приэлектродных областей, где электрическое поле и плотность тока разряда усиливаются за счет ножевой формы электрода. Причем генерация наблюдается и из области, которая примыкает к боковой поверхности анода. В центральной части промежутка плотность мощности лазерного излучения уменьшается, что можно объяснить как уменьшением в центральной части промежутка параметра E/p , так и его увеличением выше оптимального значения [15]. С увеличением давления азота автограф лазерного излучения существенно изменяется (рис. 2, *b*). В середине промежутка (ближе к аноду) при неизменной юстировке резонатора появляется третье пятно генерации. При давлении азота 2 atm среднее значение параметра E/p в азоте при максимальном напряжении на промежутке составляет всего $\sim 55 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$. При таком значении параметра E/p порог генерации в азоте не должен достигаться. Однако у ножевых электродов электрическое поле превышает среднее и генерация, как видно из рис. 2, *b*, имеет место. Порог генерации в этих областях при низких усредненных значениях параметра E/p достигается за счет усиления электрического поля у обоих электродов. Кроме того, у электродов плотности тока разряда максимальны, что увеличивает мощность накачки и способствует достижению порога генерации. Появление третьего лазерного пучка в промежутке можно объяснить только усилением электрического поля в этой области. Для получения генерации, как мы уже отмечали, необходимо, чтобы E/p было не менее $100 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$. Следовательно, при развитии пробоя промежутка имеется фаза разряда, при которой наблюдается значительное увеличение электрического поля в промежутке.

Как показывают эксперименты, область повышенного электрического поля, фиксируемая по УФ-генерации в азоте, возникает в промежутке перед фронтами волн ионизации (диффузными струями). Причем при развитии волн ионизации навстречу наибольшее усиление электрического поля при повышенном давлении азота должно происходить в той части промежутка, где волны ионизации встречаются. На распределении по промежутку плотности мощности лазерного излучения и интенсивности свечения промежутка видно, что генерация идет из части промежутка, которая светится более слабо (рис. 2, *b*). На рис. 2, *c* приведена фотография разряда в тех же условиях при большей

чувствительности фотоаппарата. Из этой фотографии следует, что в области генерации происходит слияние диффузных струй, которые развиваются навстречу от катода и анода. Картина слияния диффузных струй различается по длине электродов. Так, при слиянии трех анодо-направленных струй на одну катодонаправленную струю (область 1 на рис. 2, с) яркость излучения последней усиливается, и на аноде видно более яркое пятно. Подобная картина наблюдается в другом месте промежутка (область 2), но при этом несколько катодонаправленных струй замыкается на одну анодонаправленную струю. Кроме того, наблюдается перекрытие встречных струй под углом к направлению движения струй. При уменьшении межэлектродного зазора до 12 мм характер разряда при вариации давления не меняется, темная полоса примерно на одной трети расстояния от анода сохраняется, и из этой области при повышенных давлениях азота регистрируется третий лазерный пучок.

Из проведенных экспериментов однозначно следует, что в области промежутка, где встречаются диффузные струи (фронты волн ионизации) при повышенных давлениях азота электрическое поле усиливается, что подтверждает генерация в азоте. Данные результаты поддерживают механизм генерации СЛЭП, который описан в [7,8,12,13].

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, ГК № 02.740.11.0562.

Список литературы

- [1] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* // Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [2] *Райзер Ю.П.* // Физика газового разряда. Долгопрудный: Изд. дом „Интеллект“, 2009. 736 с.
- [3] *Ретин П.Б., Реньев А.Г.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 1. С. 78–85.
- [4] *Pai D., Stancu G.D., Lacoste D.A., Laux C.O.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. 045030 (7p.).
- [5] *Tardiveau P., Moreau N., Bentaleb S., Postel C., and Pasquiers S.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 175202 (11 p.).
- [6] *Ding W., Li F., Yang L.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. N 11. P. 2207–2212.
- [7] *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 2. С. 51–59.

- [8] *Tarasenko V.F., Bakshat E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., and Rybka D.V.* // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16. N 4. P. 267–298.
- [9] *Akiyama H., Sakugawa T., Namihira T., Takai K., Minaitani Y., Shimomura N.* // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2007. V. 14. N 5. P. 1051–1064.
- [10] *Шулепов М.А., Тарасенко В.Ф., Гончаренко И.М., Коваль Н.Н., Костыря И.Д.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 7. С. 51–57.
- [11] *Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 18. С. 74–80.
- [12] *Тарасенко В.Ф.* // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 11. С. 1077–1081.
- [13] *Tarasenko V.F., Bakshat E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* // IEEE Transaction Plasma Science. 2009. V. 37. N 6. P. 832–838.
- [14] *Гришков А.А., Артемов К.П., Беломытцев С.Я., Рыжов В.В., Турчановский И.Ю., Шкляев В.А.* // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 9. С. 846–851.
- [15] *Тарасенко В.Ф.* // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 6. С. 489–494.
- [16] *Wagenaars E., Bowden M.D., Kroesen G.M.W.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. 075002 (4p.).