

УДК 537.527.9

Начальная фаза пробоя промежутка «острие—плоскость», заполненного азотом и SF₆ повышенного давления

Д.В. Белоплов^{1,2}, М.И. Ломаев¹, Д.А. Сорокин¹, В.Ф. Тарасенко^{1,2*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Исследована начальная стадия пробоя гексофторида серы (SF₆) и азота в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях. На промежуток с геометрией электродов «острие—плоскость» подавались импульсы напряжения с амплитудой до 350 кВ. Результаты эксперимента по регистрации динамики свечения из различных зон разрядного промежутка можно трактовать как следствие формирования волны ионизации, которая стартует от потенциального электрода с малым радиусом кривизны. Установлено, что скорость фронта волны ионизации в азоте и SF₆ при пересечении второй половины промежутка больше, чем первой. Показано, что при увеличении давления SF₆ и азота скорость фронта волны ионизации уменьшается. Установлено, что при отрицательной полярности импульса напряжения волна ионизации переключает разрядный промежуток ~ 13 мм в SF₆ при давлении 0,25 МПа со средней скоростью ~ 2 см/нс, а в азоте при давлении 0,3 МПа со средней скоростью ~ 3,6 см/нс.

Ключевые слова: гексафторид серы, азот, неоднородное электрическое поле, повышенное давление, волна ионизации; sulfur hexafluoride, nitrogen, non-uniform electric field, elevated pressure, ionization wave.

Введение

Сильноточные атмосферные разряды (молнии) развиваются в неоднородном электрическом поле за счет усиления электрического поля у головки лидера [1]. Как было установлено в последние годы, при молниях регистрируются импульсы рентгеновского излучения, обусловленные генерацией убегающих электронов [2–4]. Физические процессы при пробое промежутков в неоднородном электрическом поле широко исследуются при использовании импульсных лабораторных разрядов в неоднородном электрическом поле (см., например, [5]).

При этом в ряде работ регистрируются импульсы рентгеновского излучения, обусловленные генерацией убегающих электронов [6–10]. Однако процессы, происходящие при наносекундном фронте импульса высокого напряжения во время начальной стадии разряда, остаются слабо изученными из-за быстрого развития ионизационных процессов в промежутке. Пробой газа в этих условиях происходит за счет формирования стримера, сильноточного стримера или волны ионизации, которые распространяются от электрода с малым радиусом кривизны с высокой скоростью [6, 9–11].

Термин «сильноточный стример» был предложен в работе [6], в которой скорость стримера была определена по временной задержке между появлением импульса напряжения на высоковольтном электроде и импульса тока на низковольтном электроде. При отрицательной полярности высоковольтного электрода и фронте импульса напряжения 0,5 нс максимальная скорость V сильноточного стримера в воздухе атмосферного давления, как следует из работы [6], достигала ~ 20 см/нс. В этих условиях длина разрядного промежутка, заполненного воздухом атмосферного давления, равнялась 2 см.

Высокая скорость сильноточного стримера объяснялась генерацией короткоимпульсного пучка высокоэнергетических электронов и выносом потенциала электрода к головке стримера. Наличие пучка высокоэнергетических электронов в работе [6] было определено по тормозному рентгеновскому излучению из разрядной камеры. При положительной полярности импульса напряжения скорость сильноточного стримера увеличивалась. В работе [11], где исследования были проведены при фронте импульса напряжения ~ 0,3 нс, по динамическому емкостному току была зарегистрирована средняя скорость фронта волны ионизации до 14 см/нс. Считаем, что термины «сильноточный стример» [6] и «волна ионизации» [11] обозначают один процесс перекрытия плазмой промежутка. Однако термин «волна ионизации» более точно отражает процессы в промежутке.

Цель настоящей работы заключалась в том, чтобы экспериментально с пикосекундным временным

* Дмитрий Викторович Белоплов; Михаил Иванович Ломаев (lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Алексеевич Сорокин (SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

разрешением оптическим методом определить в азоте и смеси SF₆ с азотом при давлениях 0,02–0,3 МПа время прохождения через разрядный промежуток фронта волны ионизации.

Экспериментальная установка и методики

Разрядная камера и схема эксперимента показаны на рис. 1. Импульс напряжения от генератора РАДАН-220 [12] через короткую передающую линию подавался на электрод с малым радиусом кривизны. Напряжение измерялось с помощью емкостного делителя, который устанавливался перед разрядным промежутком. К генератору была подключена дополнительная передающая линия с волновым сопротивлением в несколько раз больше, чем у генератора РАДАН-220. Это позволило увеличить амплитуду импульса напряжения на разрядном промежутке до 350 кВ. Длительность импульса напряжения при согласованной нагрузке составляла ~2 нс, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии ~0,5 нс. Осциллограммы импульсов напряжения при различных давлениях смеси SF₆ с азотом приведены на рис. 2, а. При давлении смеси 0,25 МПа наблюдается только незавершенный пробой промежутка и амплитуда напряжения на промежутке наибольшая (осциллограмма 4 на рис. 2, а).

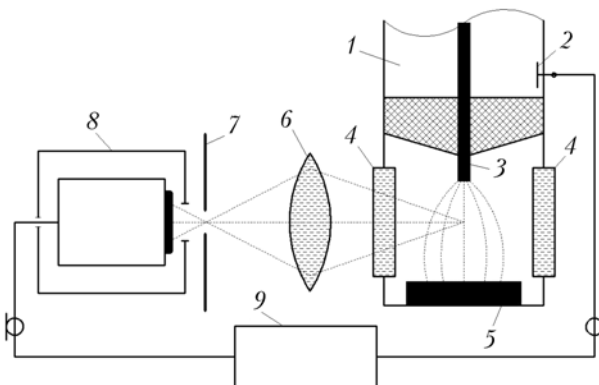


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – передающая линия генератора РАДАН-220; 2 – емкостной делитель напряжения; 3 – потенциальный электрод; 4 – боковое окно; 5 – заземленный электрод; 6 – линза; 7 – экран со щелью; 8 – фотоприемник PD025 в металлическом экране; 9 – осциллограф

Потенциальный электрод был изготовлен из фольги нержавеющей стали толщиной 100 мкм, свернутой в трубку диаметром 6 мм. Заземленный плоский электрод располагался на расстоянии 13 мм от торца потенциального электрода. Для измерения скорости волны ионизации мы использовали осциллограф DSA 72504D (25 ГГц, 100 выборка за 1 нс) и высокоскоростной фотодиод PD025 (катод LNS20 компании Photek, время нарастания переходной характеристики ~80 пс). Исследования были проведены при двух полярностях генератора. Отметим, что в данных условиях за анодом из фольги регистрировались сверхкороткий лавинный электронный пучок и рентгенов-

ское излучение, которые исследовались нами ранее (см., например, [13–16]).

Оптическое излучение через боковое окно из различных областей разряда с помощью линзы подавалось на фотодиод, размещенный в металлическом экране. Перед фотодиодом устанавливался экран со щелью шириной 1 мм. В плоскости щели строилось увеличенное (увеличение 2 : 1) изображение плазменного образования. Пространственное разрешение системы регистрации излучения из отдельных областей разрядного промежутка составляло ~1 мм в направлении продольной оси разрядного промежутка. Излучение регистрировалось из областей у катода, анода и середины промежутка. Сигналы с емкостного делителя напряжения и фотодиода подавались на осциллограф. Относительная точность привязки световых импульсов к импульсам напряжения была не хуже 10 пс. Интегральные спектры излучения снимались спектрометром EPP-2000C (Stellar-Net Inc.). Свечение разряда фотографировалось зеркальным фотоаппаратом Sony A100.

Результаты и их обсуждение

При разряде в азоте и в смеси SF₆ с добавкой 2,5% азота при давлениях 0,02–0,3 МПа и обеих полярностях импульса напряжения формировался диффузный разряд, который спустя ~5 нс и более мог контрагироваться. Азот к SF₆ добавлялся для получения спонтанного излучения на второй положительной системе азота [17]. Основной вклад в излучение из разрядной области при диффузной фазе разряда, как и в работе [14], давали полосы второй положительной системы азота. Яркие пятна на электроде с малым радиусом кривизны успевали сформироваться за время ~1 нс. На более поздних стадиях разряд, как отмечено выше, мог переходить в искровую стадию или частично перемываться анодо- или катодонаправленными лидерами. Данные режимы исследовались в работах [14, 15].

При образовании искры спектр излучения изменялся, и из промежутка регистрировались широкополосное излучение и линии ионов газа в видимой и УФ-областях спектра. Также появлялось излучение материала электродов. Переход от диффузного к завершеному искровому разряду был хорошо виден на осциллограмме импульса излучения по повторному увеличению интенсивности излучения. Осциллограммы импульсов излучения приведены для подобных условий в работе [14]. В настоящей статье измерения проводились для начальной стадии разряда. Как мы уже отмечали, во время первых 5 нс в промежутке формировался диффузный разряд.

На рис. 2, б приведены нормированные на максимальное значение интенсивности осциллограммы излучения из прикатодной области в смеси SF₆ с добавкой 2,5% азота при различных давлениях. В этих условиях интенсивность излучения второй положительной системы азота существенно превышала интенсивность излучения других полос и линий в области 200–800 нм. Осциллограммы импульсов излучения соответствуют импульсам напряжения, которые для

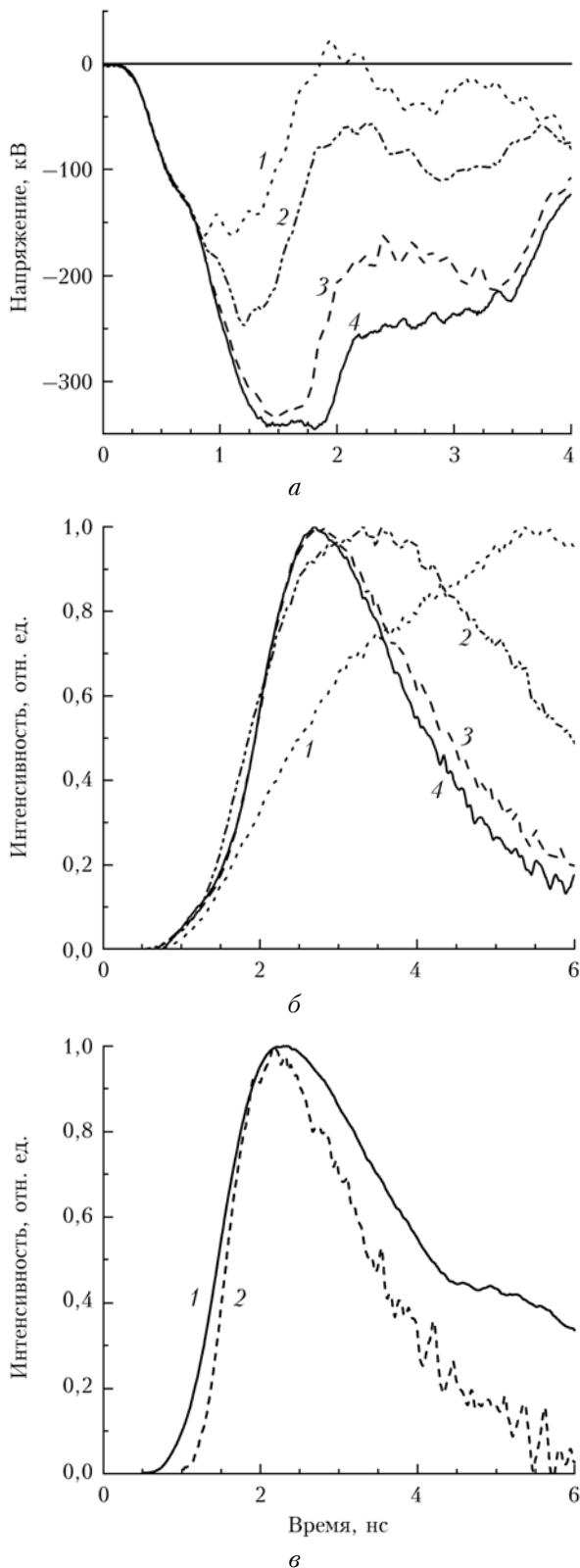


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (*а*) и излучения из прикатодной области разряда (*б*) в смеси SF₆ с добавкой 2,5% азота при давлениях 0,02 (1); 0,1 (2); 0,2 (3); 0,25 МПа (4); *в* – осциллограммы импульсов излучения из прианодной области разряда в N₂ (1) и смеси газов SF₆ и N₂ (2) при давлении 0,2 МПа при отрицательной полярности импульса напряжения

тех же давлений приведены на рис. 2, *а* и синхронизованы друг с другом с пикосекундной точностью. Видно, что пробой разрядного промежутка в зависимости от давления газа наблюдается при различных напряжениях. Тем не менее свечение из прикатодной области начинает регистрироваться практически в один и тот же момент времени независимо от величины давления газа (см. рис. 2, *б*). Отсюда следует, что задержка ионизационных процессов относительно начала роста напряжения на разрядном промежутке практически не зависит от давления. Это обусловлено усилением электрического поля на микро- и макронеоднородностях у электрода с малым радиусом кривизны. Отметим, что изменение давления газа приводит к существенному изменению напряжения пробоя, мощности, вводимой в плазму разряда, и, соответственно, к изменению формы импульсов излучения (см. рис. 2, *б*).

На рис. 2, *в* приведены нормированные осциллограммы излучения из прианодной области в N₂ и SF₆ с добавкой 2,5% азота при одном и том же давлении 0,2 МПа. Видно, что в смеси газов SF₆ и азота излучение из прианодной области регистрируется позже, чем в чистом азоте. Такую задержку в появлении излучения из прианодной области можно связать с замедлением скорости волны ионизации в тяжелом газе SF₆.

Осциллограммы импульсов излучения из прикатодной области (1), середины промежутка (2) и прианодной области (3) при давлении смеси SF₆ с добавкой 2,5% азота 0,25 МПа и отрицательной полярности импульса напряжения представлены на рис. 3. Видно, что начало импульса излучения из прианодной области регистрируется с задержкой относительно излучения из центра промежутка и прикатодной области. Это может являться следствием формирования волны ионизации, фронт которой движется от электрода с малым радиусом кривизны к плоскому электроду. Так как фаза прохождения волны ионизации соответствует началу процессов эффективного возбуждения и ионизации в среде, для определения скорости фронта волны ионизации были использованы данные, соответствующие начальным участкам осциллограмм свечения из разных областей разрядного промежутка на уровне 2% от их амплитудных значений. При этом соотношение сигнал-шум составляло ≥ 2 . Измерения показали, что в SF₆ задержки появления излучения из прианодной области больше, чем в азоте. Эти задержки увеличиваются с ростом давления газа.

Аналогичная динамика излучения наблюдалась при подаче на потенциальный электрод импульсов напряжения положительной полярности. Однако в этом случае задержка становилась меньше. Так, например, для N₂ при давлении 0,3 МПа при отрицательной полярности задержка в появлении сигнала у анода относительно катода составила ~ 340 пс ($V \approx 3,6$ см/нс), а при положительной полярности ~ 240 пс ($V \approx 5$ см/нс). Минимальная разрешимая задержка в появлении сигнала у анода относительно катода ~ 110 пс ($V \approx 11$ см/нс) была зарегистрирована в N₂ при давлении 0,1 МПа и положительной полярности импульса напряжения.

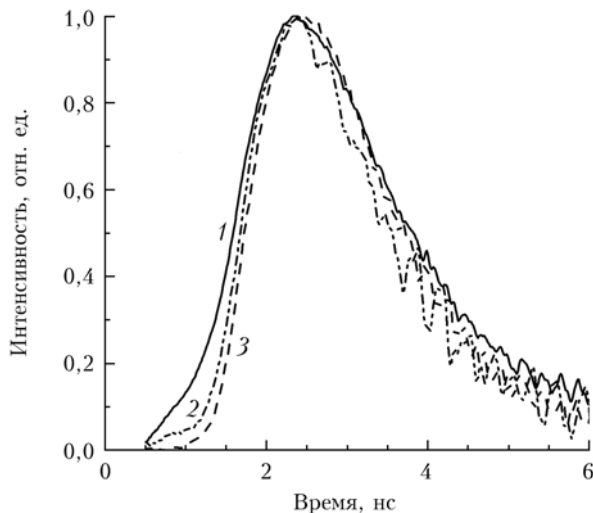


Рис. 3. Осциллограммы импульсов излучения из прикатодной области (1), середины промежутка (2) и прианодной области (3) в SF₆ с добавкой 2,5% азота при давлении 0,25 МПа и отрицательной полярности импульса напряжения

Необходимо отметить, что при обеих полярностях и всех давлениях газов задержка в появлении свечения из середины промежутка и зоны вблизи плоского электрода меньше, чем из зоны вблизи потенциального электрода и середины промежутка. Это указывает на то, что скорость фронта волны ионизации по мере продвижения увеличивается.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. При отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны у катода на фронте волны ионизации генерируются убегающие электроны, которые осуществляют предыонизацию газа и обеспечивают продвижение фронта волны ионизации от катода. Подобный механизм рассматривался в [10, 11, 13]. При положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны первые электроны также появляются за счет усиления электрического поля на макро- и микро неоднородностях анода и вырывания электронов из молекул газа [18]. Часть этих электронов набирает энергию, достаточную для выбивания из анода рентгеновских квантов со сравнительно малой энергией. Это мягкое излучение создает у анода дополнительные начальные электроны, из которых формируются лавины и стримеры. Далее часть электронов в головках лавин и стримеров переходит в режим убегания и набирает энергию, достаточную для генерации мягкого характеристического излучения молекулами газа. Высокая эффективность генерации характеристического излучения в воздухе была теоретически показана в работах [8, 19]. Там же приведены фотографии диффузной короны, однородность свечения которой не зависела от полярности электрода с малым радиусом кривизны. За счет изотропного характеристического излучения обеспечивается продвижение волны ионизации от анода к катоду. Большая скорость катодно-направленной волны ионизации определяется меньшим «размытием» фронта волны ионизации убегающими электронами при положительной полярности импульса напряжения.

Заключение

Проведенные оптические измерения показали, что формирование волны ионизации в условиях данного эксперимента начинается на фронте импульса напряжения и время появления излучения у электрода с малым радиусом кривизны при одной полярности импульса напряжения существенно не зависит от давления SF₆ и азота. При этом реализуются высокие средние скорости распространения фронта волны ионизации от электрода с малым радиусом кривизны (до 11 см/нс в N₂ при давлении 0,1 МПа и при положительной полярности). Установлено, что скорость волны ионизации в азоте и SF₆ при пересечении второй половины промежутка больше, чем первой. Показано, что при увеличении давления SF₆ и азота скорость фронта волны ионизации уменьшается как при отрицательной, так и при положительной полярности импульса напряжения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00105-а.

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
2. Dwyer J.R., Rassoul H.K., Al-Dayeh M., Caraway L., Chrest A., Wright B., Kozak E., Jerauld J., Uman M.A., Rakov V.A., Jordan D.M., Rambo K.J. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L01803.
3. Hazleton B.J., Grefenstette B.W., Smith D.M., Dwyer J.R., Shao X.M., Cummer S.A., Chronis T., Lay E.H., Holzworth R.H. The spectral dependence of terrestrial γ -ray flashes on source distance // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L01108.
4. Гуревич А.В., Караимтин А.Н., Рябов В.А., Чубенко А.П., Щепетов А.Л. Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробой на убегающих электронах // *Успехи физ. наук.* 2009. Т. 179, № 7. С. 779–790.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 736 с.
6. Васильяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н. Влияние крутизны фронта высоковольтных наносекундных импульсов напряжения на пробой воздушных промежутков // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25, вып. 18. С. 74–80.
7. Dwyer J.R., Saleh Z., Rassoul H.K., Concha D., Rahman M., Cooray V., Jerauld J., Uman M.A., Rakov V.A. A study of X-ray emission from laboratory sparks in air at atmospheric pressure // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D23207.
8. Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 11. С. 1009–1017.
9. Орешкин Е.В., Баренгольц С.А., Орешкин В.И., Чайковский С.А. Характерная длина и время усиления лавины убегающих электронов в сильных электрических полях // *Письма в ЖТФ.* 2012. Т. 38, вып. 13. С. 17–26.
10. Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Рыбка Д.В. Пробой в воздухе атмосферного давления при наносекундной длительности импульса напряжения за счет убегающих электронов // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 1. С. 103–108.
11. Tao Shao, Tarasenko V.F., Chen Zhang, Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksh E.Kh.,

- Ping Yan.* Application of dynamic displacement current for diagnostics of subnanosecond breakdowns in an inhomogeneous electric field // Review of Scientific Instruments. 2013. V. 84. P. 053506-1–053506-7.
12. *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шнак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И.* РАДАН – малогабаритные высокопоточные ускорители электронов импульсно-периодического действия // Приборы и техн. эксперим. 1989. № 2. С. 146–149.
 13. *Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* Generation of super-short avalanche electron beams and formation of diffuse discharges in different gases at high pressure // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16, N 4. P. 267–298.
 14. *Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Кривоногова К.Ю.* Излучательные характеристики азота при возбуждении объемным разрядом, инициируемым пучком убегающих электронов // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 107, № 1. С. 40–47.
 15. *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А.* Переход от диффузного к искровому разряду при наносекундном пробое азота и воздуха повышенного давления в неоднородном электрическом поле // Ж. техн. физ. 2013. Т. 83, вып. 8. С. 29–35.
 16. *Рыбка Д.В., Андроников И.В., Евтушенко Г.С., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Тригуб М.В., Шутько Ю.В.* Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 85–90.
 17. *Вильтовский П.О., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* Генерация в УФ-, ИК- и видимой областях спектра в диффузном разряде, формируемом убегающими электронами лавин // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 7. С. 605–609.
 18. *Мюллер Э.* Автоионная микроскопия // Успехи физ. наук. 1967. Т. 92, вып. 2. С. 293–320.
 19. *Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Шутько Ю.В.* Генерация мягкого рентгеновского излучения и его роль в развитии пробоя воздушного промежутка при повышенных давлениях // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 22. С. 26–33.

D.V. Beloplotov, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko. **The initial stage of the breakdown of discharge gap “point–plane” filled with nitrogen and SF₆ at elevated pressure.**

The initial stage of the breakdown of sulfur hexafluoride (SF₆) and nitrogen in the non-uniform electric field at high pressures was investigated. High voltage pulses with amplitude of up to 350 kV were applied across the discharge gap with “point–plane” geometry of the electrodes. The experimental results on the dynamics of the light emission from the different zones of the discharge gap can be explained by formation of the ionization wave started from the potential electrode with a small radius of curvature. It was found that the speed of ionization wave front in nitrogen and SF₆ is higher in the second half of the discharge gap as compared to the first one. At increasing SF₆ and nitrogen pressure the speed of ionization wave front was shown to decrease. At negative polarity of high voltage pulse the average speed of ionization wave front was shown to be of ~ 2 cm/ns in SF₆ at a pressure of 0.25 MPa and ~ 3.6 cm/ns in nitrogen at a pressure of 0.3 MPa.