

## Генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка при наносекундном разряде в плотных газах

Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, И.Д. Костыря,  
М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко\*

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

Поступила в редакцию 16.05.2008 г.

Изучены свойства сверхкоротких лавинных электронных пучков (СЛЭП), генерируемых в неоднородном электрическом поле при повышенном давлении различных газов, с временным разрешением  $\sim 100$  пс и менее (до  $\sim 80$  пс). СЛЭП получен в гелии при давлении до 12 атм, в азоте до 5 атм, ксеноне и элегазе до 2 атм. Показано, что при генерации СЛЭП угол разлета потока электронов превышает  $2\pi$  ср. Обнаружены режимы генерации импульсов СЛЭП, в которых импульс тока пучка имеет два максимума. Показано, что для генерации электронов с «аномальной» энергией необходимо использовать катоды с большим радиусом кривизны. Установлено, что режим генерации СЛЭП в неоднородном электрическом поле реализуется при существенно меньших напряжениях на промежутке, чем в однородном электрическом поле.

*Ключевые слова:* сверхкороткий лавинный электронный пучок, убегающие электроны, наносекундный разряд.

### Введение

Впервые пучок убегающих электронов за фольгой был получен в работе [1]. Однако амплитуда тока пучка была весьма малой (зарегистрировано  $10^9$  электронов за алюминиевой фольгой толщиной 8 мкм) и до 2002 г. условия генерации больших токов не были найдены [2]. В последние годы снова возрос интерес к изучению генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения, которые генерируются в газовых диодах при подаче на промежуток с катодом малого радиуса кривизны наносекундных импульсов высокого напряжения [3–11].

Наибольший интерес для применений вызывают пучки убегающих электронов с максимальной амплитудой, которые регистрируются за фольгой газовых диодов. Однако получение и измерение пучков убегающих электронов, генерируемых в газовых диодах при повышенных давлениях, из-за их малой длительности затруднительно. Для получения максимальных амплитуд сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) за фольгой нужны генераторы импульсов с напряжением в сотни киловольт при длительности переднего фронта импульса короче 1 нс, а также газовые диоды оптимальной конструкции.

Для регистрации временных и амплитудных характеристик тока и напряжения необходимы датчики, ослабители, кабели и осциллографы с высоким вре-

менным разрешением ( $\sim 0,1$  нс и выше). Кроме того, нужна теоретическая модель, которая правильно объясняет последовательность физических процессов, происходящих в газовом диоде. Знание основных физических процессов, их последовательность и взаимосвязь должны облегчить выбор оптимальных параметров импульса напряжения и конструкции газового диода. Однако в имеющихся публикациях данные о параметрах пучков убегающих электронов, а также предлагаемые механизмы генерации убегающих электронов в газовых диодах существенно отличаются [1–11].

В данной статье рассмотрено влияние различных параметров на генерацию сверхкороткого электронного пучка и определены условия, при которых реализуются максимальные амплитуды СЛЭП. На основе полученных данных уточняются механизмы генерации СЛЭП в газовых диодах при повышенных давлениях.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились с использованием газовых диодов, один из которых показан на рис. 1, и различных генераторов наносекундных импульсов.

Катодом в газовом диоде служили трубка диаметром  $\sim 6$  мм из стальной фольги толщиной 100 мкм или стальной шар диаметром 9,5 мм или стальная игла. Вывод электронного пучка осуществлялся через алюминиевую фольгу толщиной 10–500 мкм или через алюминиево-бериллиевую фольгу толщиной  $\sim 50$  мкм. Расстояние между анодом и катодом основного зазора могло изменяться от 0 до 30 мм.

\* Евгений Хапмович Бакшт; Александр Геннадьевич Бураченко; Игорь Дмитриевич Костыря; Михаил Иванович Ломаев; Дмитрий Владимирович Рыбка; Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

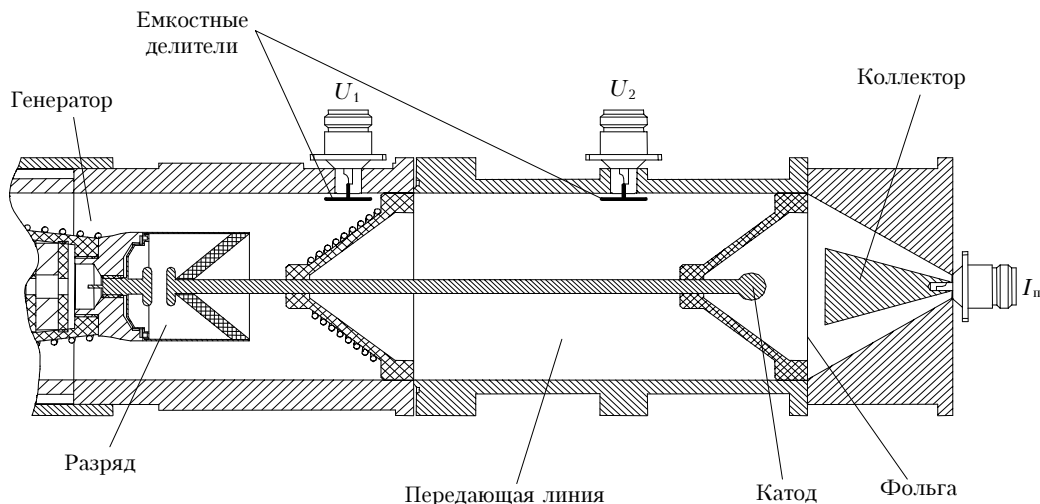


Рис. 1. Конструкция генератора СЛЭП-150 с газовым диодом и системой регистрации

Диод заполнялся различными газами (воздух, гелий, водород, неон, азот, метан, аргон, криптон, ксенон, элегаз), давление которых могло изменяться от 0,1 торр до 15 атм. Основные измерения были выполнены при заполнении газового диода воздухом атмосферного давления.

Генераторы РАДАН-220 [12] (две сборки, генераторы № 1 и 2) имели волновое сопротивление  $\sim 20$  Ом и формировали на разрядном промежутке в режиме холостого хода импульс напряжения с амплитудой  $\sim 270$  кВ, длительностью на полувысоте  $\sim 2$  нс при согласованной нагрузке и переднем фронте  $\sim 0,5$  нс. Генератор № 1 подключался к газовому диоду с минимальной индуктивностью (меньше, чем у генератора № 2) и формировал импульс напряжения с более коротким фронтом. Это позволило с помощью генератора № 1 увеличить ток пучка за фольгой (число электронов за фольгой).

Генератор СЛЭП-150 (генератор № 3) формировал импульсы напряжения в линии с волновым сопротивлением 100 Ом и амплитудой в падающей волне  $\sim 130$  кВ, длительностью на полувысоте  $\sim 1$  нс при согласованной нагрузке и переднем фронте  $\sim 0,3$  нс. Обострительный разрядник и передающая линия вместе с емкостными делителями показаны на рис. 1. Использование нескольких генераторов и их различныхборок позволило изменять длительность переднего фронта и амплитуду импульса напряжения на промежутке.

Ток пучка измерялся с помощью коллекторов с временным разрешением 50–100 пс [13, 14]. Для регистрации сигналов с емкостного делителя, коллекторов и шунтов применялись осциллографы TDS-6604 (6 ГГц и 20 выборок в 1 нс) или DPO70604 (6 ГГц и 25 выборок в 1 нс). Интегральная картина свечения разряда фотографировалась цифровым фотоаппаратом. Экспозиционная доза рентгеновского излучения определялась с помощью дозиметров Argow-Tech, Inc. (Model 138) и VICTOREEN 541R, которые были чувствительны к излучению с энергией квантов более 16 и 60 кэВ соответственно. Дозиметры устанавливались на расстоянии 0,1–2 см от плоскости фольги

перпендикулярно оси катода. Временная форма импульсов рентгеновского излучения регистрировалась с помощью полупроводникового детектора СПД11-04, временное разрешение которого составляло  $\sim 2$  нс. Детектор был предназначен для регистрации рентгеновских квантов с энергией от 0,4 до 40 кэВ. Как показали измерения, он имел более высокую чувствительность к электронам пучка, чем к квантам рентгеновского излучения.

## Результаты измерений

Характерные осциллограммы импульсов тока разряда, напряжения на диоде, а также импульсы тока пучка показаны на рис. 2.

В оптимальных условиях для достижения максимальной амплитуды тока пучка генерация СЛЭП происходит при максимальном напряжении. При этом в промежутке формируется диффузный разряд с яркими катодными пятнами. На основе измерений импульсов тока разряда, напряжения на газовом диоде и тока пучка электронов в различных условиях, измерений параметров рентгеновского излучения из газового диода, а также наблюдений за формой разряда в промежутке было установлено следующее.

*Длительность импульса СЛЭП*, регистрируемая за фольгой газового диода, зависит от конструкции катода и межэлектродного расстояния, параметров генератора, давления и сорта газа в промежутке. Наименьшие длительности для воздуха атмосферного давления в газовом диоде (не более 80 пс) регистрировались при напряжении на промежутке в сотни киловольт, межэлектродном зазоре  $\sim 10$  мм и при использовании коллекторов с приемной частью малой площади (диаметр 3 мм). Причем в этих условиях длительность импульса СЛЭП обычно ограничивается разрешением осциллографа, что подтверждает положительный выброс на осциллограмме тока пучка. Однако длительность импульса СЛЭП, генерируемая из газового диода, по всей площади фольги больше 80 пс. Так, длительность импульса на полувысоте увеличивается при увеличении диаметра приемной

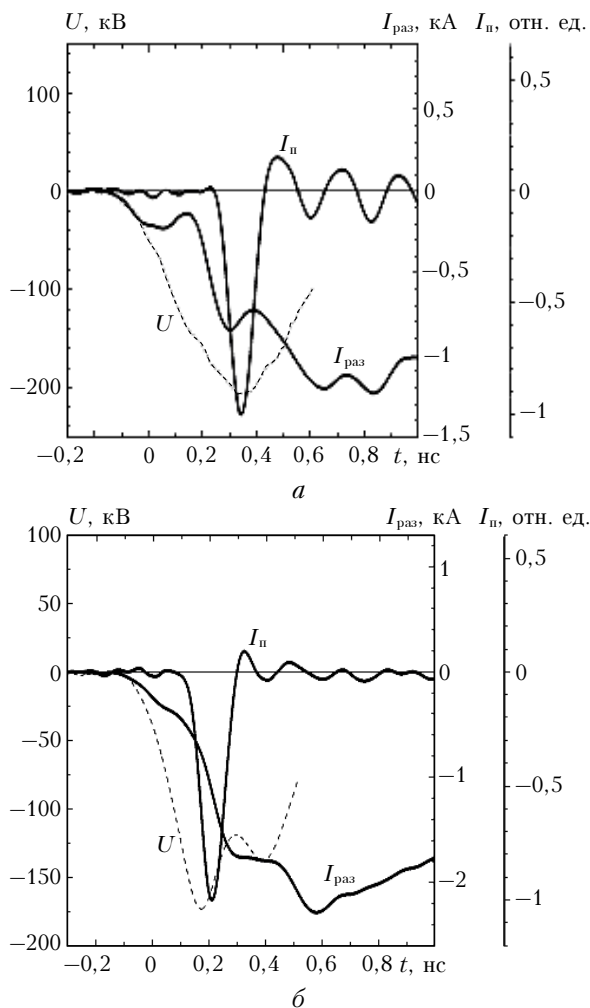


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока разряда  $I_{\text{раз}}$ , напряжения на промежутке  $U$  и тока пучка электронов за фольгой  $I_{\text{п}}$  в воздухе при давлении 1 атм. Генератор № 3, катод – шар (а), трубка (б)

площадки коллектора, при сборе электронов, летящих под большими углами к центральной оси газового диода, при увеличении длительности переднего фронта импульса напряжения. Кроме того, в определенных режимах длительность импульса СЛЭП может существенно превышать 100 пс. Длительности  $\sim 200$  пс были получены в гелии, элегазе, азоте и воздухе при напряжении генератора 25 кВ и давлениях в десятки–сотни торр. При напряжении на промежутке  $\sim 250$  кВ увеличение давления элегаза в газовом диоде до 1,5–2 атм также приводило к росту длительности импульса СЛЭП до  $\sim 150$  пс. Интересная форма импульса тока пучка была нами впервые зарегистрирована при экспериментах с малыми зазорами в газовом диоде ( $< 8$  мм). Часть импульсов СЛЭП имела два максимума.

Угол разлета уходящих электронов, как было нами установлено, даже при малых зазорах между катодом и анодом не соответствует направлению силовых линий в газовом диоде при отсутствии в нем плазмы. Было обнаружено, что при генерации СЛЭП уходящие электроны регистрируются не только в на-

правлении фольги, но и в направлении боковых стенок газового диода (в угол более  $2\pi$  ср). Причем уходящие электроны регистрируются через окно в боковой стенке газового диода при межэлектродном зазоре, который в несколько раз меньше расстояния от катододержателя до боковой стенки газового диода. Из этих экспериментов следует, что за фольгой с торца газового диода регистрируется лишь часть потока СЛЭП.

Максимальные амплитуды тока СЛЭП реализуются в легких газах и при формировании диффузного (объемного) разряда в газовом диоде. При этом давление газа должно быть минимальным, при котором еще сохраняется режим генерации СЛЭП. Режим генерации СЛЭП, по сравнению с режимом вакуумного диода, характеризуется большим углом разлета уходящих электронов и сокращением длительности импульса тока пучка уходящих электронов до  $\sim 100$  пс. Контрагирование разряда после генерации СЛЭП, по-видимому, не оказывает существенного влияния на его параметры. При атмосферном давлении различных газов наибольшие амплитуды тока пучка реализуются в гелии, однако оптимальные геометрия промежутка и конструкция катода для различных газов могут отличаться. В воздухе атмосферного давления максимальная амплитуда тока СЛЭП была получена с генератором № 1. За алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм было зарегистрировано  $2,7 \cdot 10^{10}$  электронов, что при длительности импульса на подвысоте 90 пс составляет 50 А.

Распределение электронов по энергиям определялось с помощью кривых ослабления и методики восстановления спектра, подобной описанной в [5]. В качестве априорной информации по форме спектра мы полагали, что один из максимумов на распределении электронов по энергиям должен соответствовать напряжению на промежутке во время генерации СЛЭП. Кроме того, полученные спектры сравнивались с данными на времяпролетном спектрометре. Было установлено, что в пучке присутствуют три группы электронов и что при увеличении радиуса кривизны катода доля электронов с «аномальной» [1, 2, 5] энергией увеличивается. При максимальных амплитудах тока пучка за фольгой главный максимум на распределении электронов по энергии примерно соответствует напряжению на промежутке во время генерации СЛЭП.

Рентгеновское излучение при отрицательной полярности катода, который имеет малый радиус кривизны и концентрирует электрическое поле, было зарегистрировано как из промежутка, так и из анода. При установке дозиметра за анодом максимальные дозы регистрировались при аноде из тяжелых металлов. Так, экспозиционная доза за фольгой из меди толщиной 20 мкм с генератором № 1 составила  $\sim 1,5$  мР, а с генератором № 3  $\sim 0,6$  мР. Обычно рентгеновское излучение регистрируется из промежутка и из анода при катоде с малым радиусом кривизны. Генерация уходящих электронов и тормозное рентгеновское излучение при этом регистрируются как при потенциальном катоде, так и при заземленном. Важно, чтобы катод был малого размера по сравнению

с анодом и параметры импульса напряжения соответствовали условиям генерации СЛЭП.

Длительность импульса рентгеновского излучения на полувывоте, равная  $\sim 2$  нс, была обусловлена временным разрешением полупроводникового детектора СППД11-04. При малых зазорах рентгеновское излучение было зарегистрировано и при потенциальном аноде, который был выполнен в виде стержня из вольфрама. Однако энергия рентгеновских квантов и экспозиционная доза в этих условиях были существенно меньше.

## Механизм генерации убегающих электронов в газовом диоде

Полученные данные показывают, что механизм генерации убегающих электронов и увеличения их энергии в результате движения к аноду в газовом диоде существенно отличается от генерации электронов и их ускорения в вакуумном диоде. Во-первых, при коротких импульсах напряжения ( $< 1$  нс), катоде в виде шара и одинаковых напряжениях на промежутке генерация пучка электронов наблюдается только при заполнении диода газом, а в вакууме отсутствует. Во-вторых, угол разлета убегающих электронов в режиме СЛЭП превышает  $2\pi$  ср. В-третьих, на длительность импульса СЛЭП влияют в определенных условиях сорт газа и его давление.

Выделим несколько основных процессов, которые приводят к генерации пучка убегающих электронов, регистрируемого за фольгой газового диода с максимальной амплитудой или максимальной энергией электронов. Отметим, что такой пучок мы предпочли называть сверхкоротким лавинным электронным пучком.

### Процесс эмиссии электронов с катода

Электроны с катода в газовых диодах появляются за счет автоэмиссии. Высокая напряженность электрического поля достигается за счет усиления поля на микро- и макронеоднородностях катода и катододержателя на фронте импульса напряжения.

### Быстрые электроны

Эмитируемые электроны за счет концентрации электрического поля у катода могут приобретать энергию, достаточную для их убегания (быстрые электроны). При удалении от микроострий на катоде и кромки катода напряженность электрического поля уменьшается и быстрые электроны теряют свою энергию в основном на ионизацию частиц в прикатодной области. Нелокальный критерий появления заметного числа электронов, уходящих из объема без размножения (режим убегания электронов), для однородного электрического поля описан в [4]. В неравномерном электрическом поле (как в нашем эксперименте) должен быть найден другой критерий, который учтет неоднородное распределение электрического поля в области убегания электронов. При этом следует учитывать, что электрическое поле, доста-

точное для убегания электронов, уменьшается при увеличении начальной энергии электронов [15].

### Формирование диффузного разряда

Таким образом, за счет генерации быстрых электронов происходит предварительная ионизация газа у катода. В растущем, за счет увеличения напряжения на промежутке, электрическом поле появившиеся у катода электроны инициируют развитие электронных лавин. Концентрация начальных электронов настолько велика, что головки лавин перекрываются до образования стримера и у катода образуется сравнительно плотная плазма диффузного разряда, фронт которой движется от катода к аноду. При этом на фронте плотной плазмы, который образуют головки лавин, движущихся к аноду, возникает избыточный отрицательный заряд. При достижении критического поля между фронтом плотной плазмы и анодом часть электронов с наибольшей энергией из области избыточного отрицательного разряда также переходит в режим убегания. Критерий убегания электронов для данной ситуации также требует определения. При его выводе необходимо учитывать как неоднородность распределения электрического поля по промежутку, так и влияние избыточного отрицательного заряда. За счет убегающих электронов, генерируемых и ускоряемых в области между фронтом плазмы и анодом, диффузный разряд формируется во всем разрядном промежутке.

### Генерация СЛЭП

Генерация пучка убегающих электронов (СЛЭП), регистрируемого с максимальными амплитудами за фольгой газового диода, является сложным процессом и определяется следующими факторами:

- во-первых, усилением поля у катода и появлением автоэмиссионных электронов, часть из которых (быстрые электроны) переходит в режим убегания, осуществляет предьонизацию прикатодной области и способствует созданию плазмы у катода;

- во-вторых, достижением критического поля между фронтом поляризованной плазмы диффузного разряда и анодом (фольгой и боковыми стенками газового диода). Как следует из данных, полученных с помощью камеры-обскуры, в воздухе атмосферного давления и оптимальном межэлектродном промежутке электроны в прикатодной области начинают ускоряться в пределах телесного угла, превышающего  $2\pi$  ср. При этом критическое поле для реализации режима убегания электронов в неоднородном электрическом поле и при поляризации фронта плазмы существенно отличается от критического поля в однородном электрическом поле и в отсутствие электронов с повышенной энергией;

- в-третьих, влиянием на ускорение электронов в промежутке волны ионизации, распространяющейся от катода к аноду. Только движением фронта волны ионизации диффузного разряда можно объяснить генерацию значительного числа электронов с «аномальной» энергией при катоде в виде шара. Определение точной взаимосвязи всех этих процессов

требует проведения дальнейшего моделирования, при этом необходимо учитывать реальную геометрию газового промежутка и распределение электрического поля в нем.

Для реализации режима СЛЭП необходимо создать у катода плотную плазму в момент времени, когда амплитуда напряжения на промежутке максимальна.

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Генерация убегающих электронов за счет усиления электрического поля на электродах и в промежутке — это обычное явление при импульсных разрядах в неоднородном электрическом поле, но их регистрация требует специальных методик. Убегающие электроны оказывают существенное влияние на время запаздывания пробоя промежутков и на пространственные формы разрядов наносекундной длительности.

Авторы благодарят В.Г. Шпака за предоставление генератора РАДАН-220 и Д.В. Шитца за помощь в создании генератора СЛЭП-150.

1. *Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* Быстрые электроны и рентгеновское излучение наносекундных импульсных разрядов в газах при давлениях 0,1–760 торр // *Ж. техн. физ.* 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
2. *Babich L.P.* High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Natural Phenomena. (ISTC Science and Technology Series. V. 2). Arlington, VA: Futurepast, 2003. 358 с.
3. *Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D.* Supershort Electron Beam from Air Filled Diode at Atmospheric Pressure // *Laser and Particle Beams*. 2005. V. 23. N 4. P. 545–551.
4. *Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.* High-power subnanosecond beams of runaway electrons and volume discharge formation in gases at atmospheric pressure // *Plasma Devices and Operations*. 2005. V. 13. N 4. P. 231–279.
5. *Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Петин В.К., Шляхтун С.В.* О распределении по энергиям электронов

пучка при объемном наносекундном разряде в воздухе атмосферного давления // *Ж. техн. физ.* 2006. Т. 76. Вып. 12. С. 37–46.

6. *Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарытов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.А.* О динамике формирования субнаносекундного электронного пучка в газовом и вакуумном диоде // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 35–44.
7. *Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* Объемное рентгеновское излучение в газовых диодах при атмосферном давлении // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33. Вып. 7. С. 79–86.
8. *Бакирт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф.* Сверхкороткий лавинный электронный пучок в азоте и гелии, генерируемый на плоской части импульса напряжения // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 29–36.
9. *Костыря И.Д., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Рыбка Д.В., Бакирт Е.Х.* О пространственном распределении потока электронов при генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка в газовом диоде // *Изв. ТПУ*. 2008. Т. 312. № 2. С. 131–135.
10. *Бакирт Е.Х., Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* Генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка в элегазе // *Изв. ТПУ*. 2008. Т. 312. № 2. С. 136–138.
11. *Бакирт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* О влиянии поперечного магнитного поля на генерацию электронного пучка в газовом диоде // *Ж. техн. физ.* 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 143–145.
12. *Яландин М.И., Шпак В.Г.* Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // *Приборы и техн. эксперим.* 2001. № 3. С. 5–31.
13. *Бакирт Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И., Куркан И.К., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* Коллекторный узел для измерения тока пучка электронов субнаносекундной длительности // *Приборы и техн. эксперим.* 2007. № 6. С. 100–103.
14. *Тарасенко В.Ф., Рыбка Д.В., Бакирт Е.Х., Костыря И.Д., Ломаев М.И.* Генерация и измерение субнаносекундных пучков электронов в газонаполненных диодах // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 2. С. 62–68.
15. *Гуревич А.В., Зыбин К.П.* Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // *Успехи физ. наук*. 2001. Т. 171. № 11. С. 1177–1199.

*E.Kh. Baksh, A.G. Burachenko, I.D. Kostyria, M.I. Lomaev, D.V. Rybka, V.F. Tarasenko. The generation of a supershort avalanche electron beam at nanosecond discharge in dense gases.*

The properties of supershort avalanche electron beams (SAEB) generated in inhomogeneous electric field at high pressure of different gases are investigated with high temporal resolution (up to ~ 80 ps). SAEB was obtained in helium at pressure of up to 12 atm, in nitrogen at pressure of up to 5 atm, in xenon and sulfur hexafluoride at pressure of up to 2 atm. At SAEB generation is shown the opening angle of SAEB flow to exceed  $2\pi$  sr. The modes of SAEB generation are observed at which SAEB current pulse has two maximums. It was shown that to generate of electrons with «anomalous» energy the cathodes with big radius of curvature should be used. The mode of SAEB generation in inhomogeneous electric field was found at lower voltages across a gap to realize as compared with homogeneous one.