

## ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОМ ПРОБОЕ

© 2013 г. В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, А. Г. Бураченко, И. Д. Костыря, Д. В. Рыбка

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru*

Поступила в редакцию 09.06.2012 г.

Окончательный вариант получен 06.11.2012 г.

Исследовано влияние конструкции катода на энергию основной группы электронов при субнано-секундном пробое в воздухе атмосферного давления. Измерения энергии электронов проводились с помощью времяпролетного спектрометра с пикосекундным временным разрешением. Показано, что при увеличении радиуса кривизны катода энергия основной группы электронов увеличивается. С использованием фильтров из алюминия толщиной 400–650 мкм установлено, что электроны с наибольшими энергиями регистрируются при импульсах напряжения с резким спадом и амплитудах импульса напряжения меньших максимальных. Генерация электронов с наибольшими энергиями происходит с большей пространственной и амплитудной нестабильностью, чем генерация электронов со средней энергией.

DOI: 10.7868/S0367292113060115

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Последние годы значительное внимание уделяется изучению генерации пучков убегающих электронов в газах повышенного давления, см., например, работы [1–7] и ссылки в них. Наиболее подробные экспериментальные исследования генерации пучков убегающих электронов были выполнены для газовых диодов, заполненных воздухом атмосферного давления. На сегодняшний день можно отметить следующие важные результаты, касающиеся параметров сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.). За алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм в воздухе атмосферного давления было получено до  $6 \times 10^{10}$  убегающих электронов [4]. За коллиматором с отверстием малого диаметра (1 мм) зарегистрированы импульсы с.л.э.п. с длительностью на полувысоте не более 25 пс, а также импульсы с.л.э.п., состоящие из двух близкорасположенных пиков [7]. Установлено, что длительность с.л.э.п. зависит от площади выходного отверстия, через которую пучок электронов попадает на приемную часть коллектора [2, 4, 7]. При этом показано, что длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте при измерении тока пучка за всей поверхностью анодной фольги составила  $\sim 100$  пс. В [8] было обнаружено, что электроны с.л.э.п. регистрируются в телесном угле, превышающем  $2\pi$  стерадиан.

Однако в работах разных групп приводятся противоречивые результаты по многим параметрам пучка убегающих электронов. Это обусловлено сложностью измерения параметров пучков электронов субнано-секундной и пикосекундной

длительности, а также сильной зависимостью параметров пучка убегающих электронов от экспериментальных условий. Один из вопросов, по которому в литературе идет дискуссия, касается генерации убегающих электронов с “аномально” энергией. Так называют электроны с энергией  $T$ , которая превышает энергию, набираемую электроном при напряжении на промежутке  $U_m$  ( $T > eU_m$ ). Из работ Бабица и Лойко (см. [1, 9] и ссылки там) следует, что в воздухе атмосферного давления максимум распределения электронов по энергиям лежит в области энергий, на  $\sim 100$  кэВ превышающих  $eU_m$ . В наших работах [8, 10, 11] электроны с энергией  $T > eU_m$  в ряде экспериментальных условий (при длительности фронта импульса короче 500 пс и катоде с увеличенным радиусом кривизны) были зарегистрированы, хотя их число оказалось мало ( $< 10\%$ ). С другой стороны, в работе [5] содержится следующее утверждение: “максимальная энергия, которую убегающие электроны приобретают в процессе ускорения, соответствует напряжению на электродах и не превышает его”. Для разрешения этого противоречия необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования генерации пучков убегающих электронов при импульсных газовых разрядах.

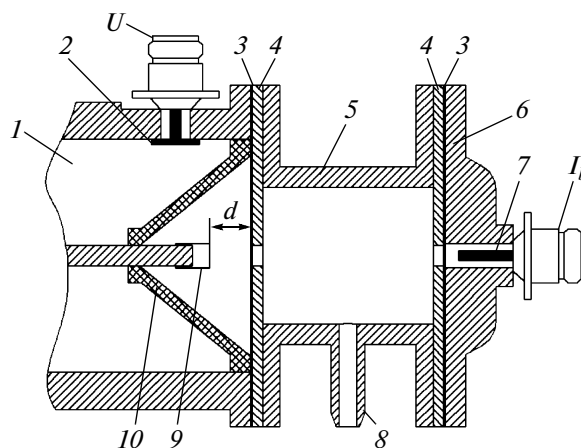
Цель данной работы — провести с помощью времяпролетного спектрометра с пикосекундным и субнано-секундным временным разрешением системы регистрации измерение энергии основной группы убегающих электронов, генерируемых в воздухе атмосферного давления, при ис-

пользовании различных катодов. Эксперименты были проведены с конструкцией газового диода, на которой получены в настоящее время наибольшие амплитуды тока с.л.э.п. [4].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ

В настоящей работе использовался генератор СЛЭП, который был специально разработан для получения пучков электронов в газовых диодах. Применялись две модификации генератора, конструкции которых приведены в работах [2, 4]. Первый генератор (СЛЭП-150) имеет короткую передающую линию, соединяющую обостренный разрядник и газовый диод. Амплитуда импульса напряжения в передающей линии при согласованной нагрузке для данной сборки генератора СЛЭП-150 составляла  $\sim 200$  кВ. Второй генератор (СЛЭП-150М) имеет дополнительную передающую линию длиной 13.3 см и два емкостных делителя, что позволяет по падающей и отраженной волне напряжения восстанавливать импульс напряжения на промежутке. Амплитуда импульса напряжения в передающей линии при согласованной нагрузке для данной сборки генератора СЛЭП-150М составляла  $\sim 140$  кВ. Различие амплитуд напряжения обусловлено различным напряжением пробоя обостренного разрядника Р-43. Волновое сопротивление передающих линий обоих генераторов равняется 100 Ом. Данные по спектрам электронов с генератором СЛЭП-150М приведены в работах [8, 10, 11], включая данные, полученные с использованием новой методики восстановления спектров по кривым ослабления энергии электронов без априорных предположений [11]. Для этого методом регуляризации Тихонова была решена обратная задача.

Основные эксперименты выполнены с использованием генератора СЛЭП-150 с короткой передающей линией. Конструкция выходной части генератора СЛЭП-150, газового диода, пролетного спектрометра и катода № 1 (трубка) показаны на рис. 1. Емкостной делитель напряжения был установлен в выходной части передающей линии, переходящей в газовый диод, на расстоянии 22 мм от торца коаксиальной линии (плоского анода). При таком расположении делителя с его помощью нельзя точно определять на промежутке амплитуду напряжения и длительность фронта импульса. Однако до прихода отраженного импульса делитель с высокой точностью регистрировал фронт падающей волны напряжения. После появления отраженной волны напряжения, регистрировалась суперпозиция обеих волн напряжения, что приводит к затягиванию измеряемого фронта импульса напряжения на 100–200 пс. Спад импульса напряжения, который



**Рис. 1.** Конструкция газового диода генератора СЛЭП-150, пролетного спектрометра и коллектора. 1 – передающая линия, 2 – емкостной делитель напряжения, 3 – фольги, 4 – диафрагмы, 5 – корпус пролетного спектрометра, 6 – корпус коллектора, 7 – приемная часть коллектора, 8 – патрубок для откачки воздуха, 9 – катод № 1 (трубка), 10 – изолятор газового диода.

определяется ростом проводимости промежутка, также регистрируется с высокой точностью. С помощью данного делителя можно с пикосекундной точностью во времени регистрировать начальный участок фронта импульса напряжения (до амплитуды  $\sim 100$  кВ). Это позволило осуществлять с высокой точностью привязку друг к другу импульсов тока пучка и импульсов напряжения. Данная возможность была использована при работе с времяпролетным спектрометром.

Эксперименты проделаны с пятью катодами, которые описаны в таблице. Катод № 1 (трубка) имел форму трубки диаметром 6 мм и был изготовлен из фольги толщиной 100 мкм из нержавеющей стали. Катод № 2 (шар) представлял собой стальной шар диаметром 9.5 мм. Катод № 3 (сетка) был выполнен в виде сетки с шагом 4 мм из параллельных проволок диаметром 0.2 мм, закрепленных на торце полого цилиндра высотой 3 мм и диаметром 30 мм с дном в виде диска. Расстояние от проволок до дна составляло 1.5 мм. Подробно такой катод диаметром 40 мм описан в [4]. Катод № 4 (конус) был выполнен из нержавеющей стали в виде конуса с углом  $82^\circ$  и радиусом округления вершины  $\sim 0.1$  мм. Основание конуса имело диаметр 6 мм и переходило в цилиндр того же диаметра. Катод № 5 (лезвие) был выполнен из куса бритвенного лезвия длиной 7 мм, закрепленного на торце трубки из фольги диаметром 6 мм. Первые три катода применялись ранее для исследования формы и амплитуды тока с.л.э.п. при использовании системы регистрации с временным разрешением 50 [4] и 25 пс [7]. Плоский анод газового диода (рис. 1) был выполнен из

Описание различных катодов, величины межэлектродных зазоров  $d$  и задержек между максимумами тока пучка  $t_1$ . Энергии электронов  $T_1-T_4$ , рассчитанные по задержкам  $t_1-t_4$

	$d$ , мм	$t_1$ , пс	$T_1$ , кэВ	$T_2$ , кэВ	$T_3$ , кэВ	$T_4$ , кэВ
Катод № 2 (шар)	8.5	240	208	244	140	460
Катод № 4 (конус)	12	250	180	180	168	300
Катод № 5 (лезвие)	11.5	290	120	120	117	190
Катод № 1 (трубка)	12	290	118	137	117	220
Катод № 3 (сетка)	6	310	96	105	90	170

алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, за которой находилась диафрагма или сетка. Межэлектродные зазоры  $d$  выбирались оптимальными для каждого из катодов. Для определения наличия электронов пучка с повышенной энергией дополнительно устанавливались фильтры из алюминия различной толщины.

Амплитуда тока пучка или число электронов в пучке определялись с помощью трех коллекторов. При измерениях тока пучка с пикосекундным временным разрешением ( $\sim 25$  пс [7]) за анодной фольгой устанавливалась диафрагма с отверстием в центре диаметром 0.5 мм и коллектор, показанный на рис. 1. Приемная часть коллектора была выполнена в виде цилиндра диаметром 3 мм и располагалась на расстоянии 5 мм от анодной фольги. С пикосекундным временным разрешением ток пучка измерялся также на расстоянии 55 мм от анодной фольги за дрейфовым пространством пролетного спектрометра, которое увеличивало пробег электронов на 50 мм. За дрейфовым пространством перед коллектором устанавливалась вторая Al фольга толщиной 10 мкм. Воздух из дрейфового пространства откачивался форвакуумным насосом.

При измерениях тока пучка с субнаносекундным временным разрешением ( $\sim 100$  пс) использовался коллектор с диаметром приемной части 20 мм [4]. Для измерения числа электронов за всей поверхностью фольги применялся коллектор с диаметром приемной части 56 мм [4]. В этом случае регистрировались практически все электроны пучка за фольгой, но временное разрешение коллектора не позволяло определить форму с.л.э.п. Ток короткого замыкания и ток разряда регистрировались шунтом на чип-резисторах [2].

Импульсы напряжения, тока пучка и тока разряда подавались на цифровой осциллограф реального времени LeCroy WaveMaster 830Zi-A с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 12.5 пс (80 выборок за наносекунду). Данные записывались в режиме реальных точек, без применения дополнительных аппроксимаций. При регистрации импульсов тока пучка использовались высокочастотный кабель RG58-A/U (Radiolab) длиной 1 м и разъемы типа N (Suhner 11

N-50-3-28/133 NE) и SMA (Radiall R125.075.000). Использование диафрагм с малым отверстием позволило проводить измерения амплитуды и длительности с.л.э.п. без дополнительных ослабителей.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе измерения энергии электронов при генерации с.л.э.п. проводились для пучков электронов, регистрируемых за участками фольги с различной площадью. Это позволило провести исследования с пролетным спектрометром с пикосекундным временным разрешением, а также регистрировать с.л.э.п. за толстыми фильтрами со всей поверхности анодной фольги. В последнем случае вероятность зарегистрировать электроны пучка с наибольшими энергиями более высокая. Ранее нами было установлено [12], что формы автографа электронного пучка за алюминиевыми фольгами толщиной 10 и 70 мкм различаются. При увеличении толщины фольги потемнение специальной чувствительной к электронам пучка пленки, которое пропорционально числу и энергии электронов, стало более неравномерным, хотя число импульсов при этом увеличилось в 3 раза. Тогда как за фольгой толщиной 10 мкм при меньшем в три раза числе импульсов, автограф с.л.э.п. был более равномерным. Из этого следует, что пространственное распределение электронов пучка с повышенной энергией более неравномерное. Измерения с различными коллекторами, проведенные в данной работе, также подтвердили данный результат.

**Измерения с пикосекундным временным разрешением.** С пикосекундным временным разрешением пучок электронов регистрировался за Al фольгой толщиной 10 мкм или за двумя такими фольгами – окнами пролетного спектрометра, который показан на рис. 1. Магнитное поле для увеличения плотности тока пучка на коллекторе не использовалось. В экспериментах без спектрометра за фольгой устанавливалась диафрагма из меди толщиной 0.25 мм с отверстием в центре диаметром 0.5 мм. Осциллограммы тока пучка (1) и импульса напряжения с емкостного делителя (3), полученные для этих условий с катодами № 2

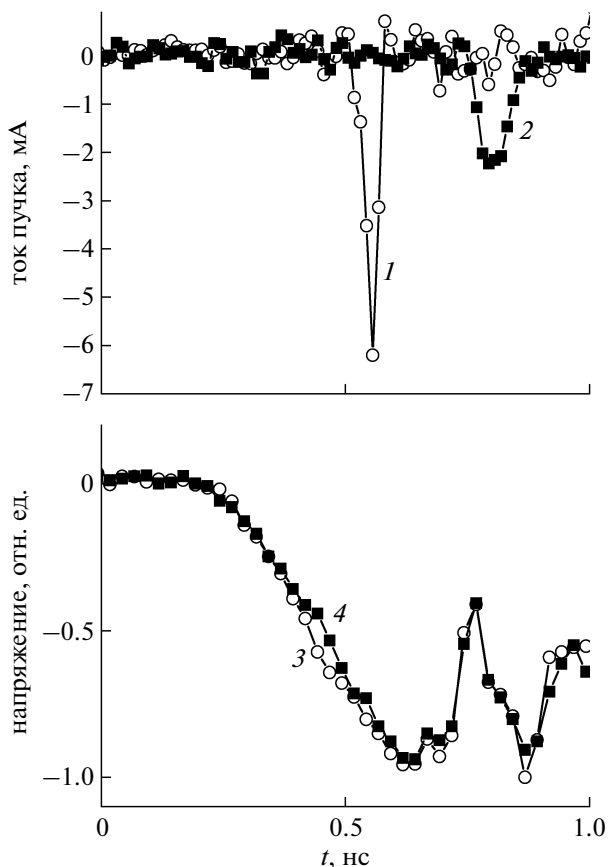


Рис. 2. Осциллограммы тока с.л.э.п. (1, 2) и напряжения (3, 4) без (1, 3) и с пролетным спектрометром (2, 4). Катод № 2 (шар).

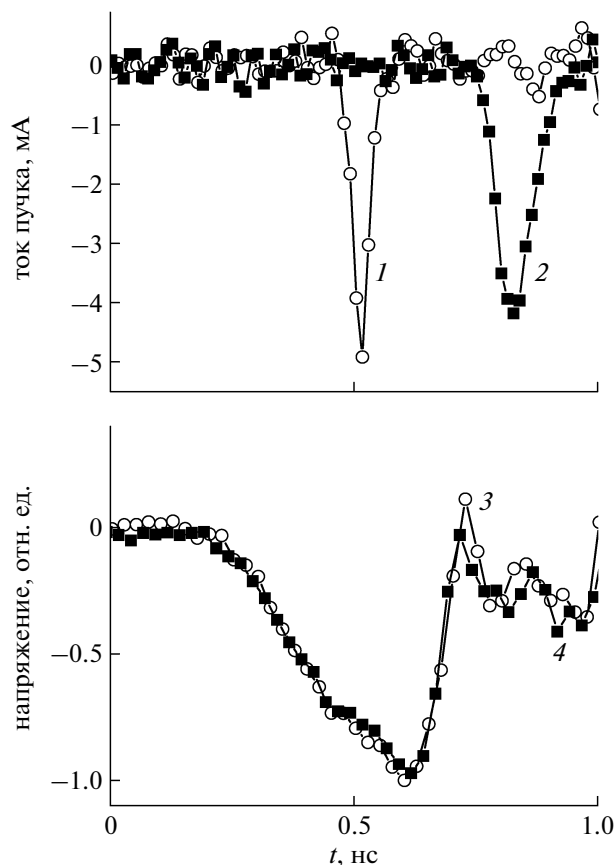


Рис. 3. Осциллограммы тока с.л.э.п. (1, 2) и напряжения (3, 4) без (1, 3) и с пролетным спектрометром (2, 4). Катод № 3 (сетка). Второй импульс тока пучка увеличен в 3 раза.

(шар) и № 3 (сетка), приведены на рис. 2 и рис. 3, соответственно. Положение во времени импульсов с.л.э.п. и напряжения с емкостного делителя относительно друг друга в этой работе точно не определялось. Привязка импульса с.л.э.п. к импульсу напряжения, точнее, к спаду импульса напряжения на промежутке на рис. 5 – рис. 7 осуществлялась на основе наших предыдущих измерений [2]. В [2] привязка импульса с.л.э.п. к импульсу напряжения была проведена с помощью емкостного тока, который регистрировался через сетку. Благодаря применению осциллографа LeCroy WaveMaster 830Zi-A с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 12.5 пс и коллектора с временным разрешением 25 пс в данной работе оба импульса тока электронного пучка (до и после спектрометра) были привязаны друг к другу с точностью не хуже  $\sim 10$  пс.

На рис. 2 и рис. 3 (осциллограммы 2 и 4) также приведены импульсы напряжения с емкостного делителя и тока пучка, полученные в экспериментах с пролетным спектрометром. Приемная часть того же коллектора располагалась на расстоянии 5 мм от второй Al фольги на расстоянии

55 мм от первой. Пучок электронов инжектировался в пролетный спектрометр через отверстие 6.7 мм в диафрагме из меди толщиной 0.25 мм. После спектрометра устанавливалась для поддержки фольги вторая диафрагма диаметром 5 мм. Увеличение отверстия в диафрагме с 0.5 до 6.7 мм позволило увеличить число электронов, попадающих на коллектор, и регистрировать пучок при той же чувствительности осциллографа. Так как осциллограммы тока пучка и напряжения с емкостного делителя без пролетного спектрометра и с пролетным спектрометром регистрировались для различных импульсов, то для определения задержки между импульсами тока пучка выбирались импульсы напряжения одинаковой формы (рис. 2 и рис. 3). Последнее повышает точность измерений. Благодаря пикосекундному временному разрешению системы регистрации энергия основной группы электронов определялась по величине задержки между максимумами тока пучка  $t_1$  (см. таблицу, рис. 2 и рис. 3) с высокой точностью. Отметим, что через малое отверстие в диафрагме (0.5 мм), а также за счет рассеяния пучка электронов при транспортировке их в

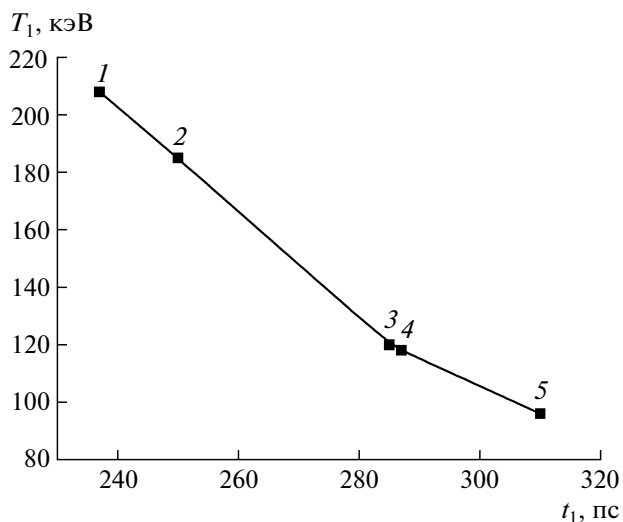


Рис. 4. Зависимость энергии электронов от задержки между максимумами импульсов тока пучка. Точка 1 — катод № 2 (шар), 2 — катод № 4 (конус), 3 — катод № 5 (лезвие), 4 — катод № 1 (трубка) и 5 — катод № 3 (сетка).

пролетном спектрометре, на коллектор с диаметром приемной части 3 мм попадало менее 0.1% от всех электронов пучка. В этих условиях можно было регистрировать электроны с энергиями, которые соответствуют энергии электронов в основной группе. Имеются в виду электроны с примерно одинаковой энергией, число которых максимально в пучке, проходящем через малое отверстие в диафрагме. На рис. 4 показана зависимость энергии электронов  $T_1$  от задержки  $t_1$  (см. таблицу) между максимумами тока пучка после прохождения пролетного спектрометра. Там же приведены (точки 1–5) конкретные значения энергии электронов для различных катодов при этих задержках. Наименьшая задержка и соответственно наибольшая энергия основной группы электронов ( $\sim 210$  кэВ) была получена для катода № 2 (шар), а наибольшая задержка — для катода № 4 (сетка).

При определении энергии электронов на рис. 4 мы регистрировали задержку между максимумами тока с.л.э.п., считая, что они определяют энергию основной группы электронов. В таблице также приведены энергии электронов  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$ , рассчитанные еще для трех различных задержек. Задержки  $t_2$  и  $t_3$  определялись по точкам, соответствующим половинным амплитудам на фронте ( $t_2$ ) и спаде ( $t_3$ ) импульса с.л.э.п. Имеются в виду амплитуды, соответствующие току пучка на пересечение прямой линии на полувысоте импульса тока пучка с кривой его фронта и кривой спада. При этом считалось, что электроны, регистрируемые на фронте и спаде импульса с.л.э.п., после пролета спектрометра также регистрируются на фронте и

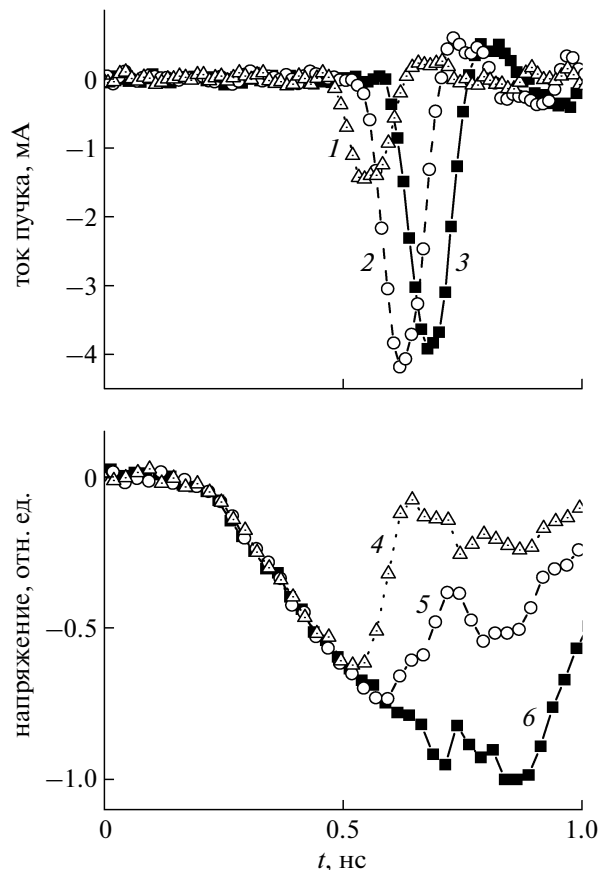
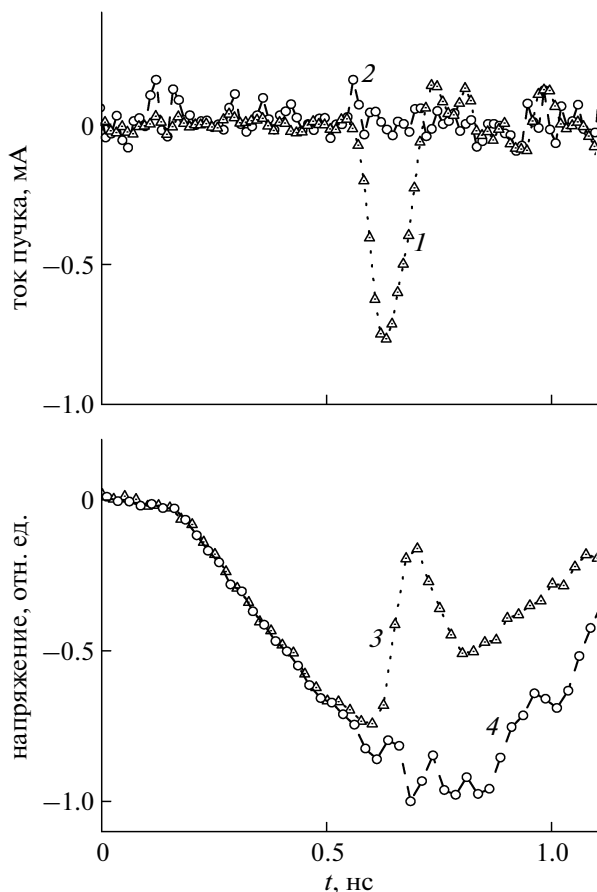


Рис. 5. Осциллограммы тока с.л.э.п. (1, 2, 3) и соответствующие им осциллограммы напряжения (4, 5, 6). Коллектор тока электронного пучка располагался за Al фольгой толщиной 10 мкм и диафрагмой диаметром 18 мм с катодом № 2 (шар). Форма импульса напряжения изменялась от импульса к импульсу. Диаметр приемной части коллектора 20 мм.

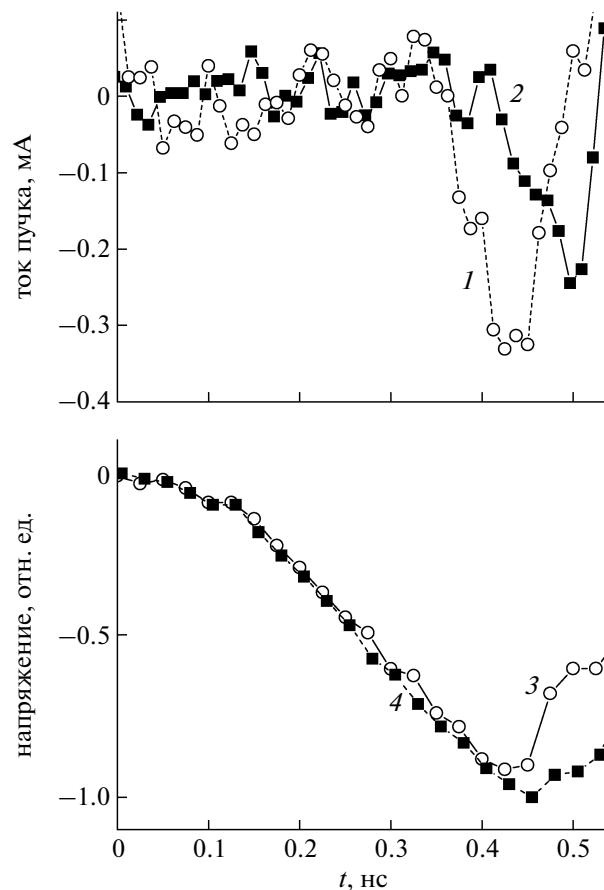
спаде импульса тока. Задержка  $t_4$  была определена в предположении, что электроны, регистрируемые на спаде импульса с.л.э.п., после пролета спектрометра регистрируются на фронте импульса тока пучка. Энергии электронов  $T_1 - T_4$  рассчитаны соответственно для задержек  $t_1 - t_4$ . Из таблицы видно, что в пучке имеются электроны с энергией большей и меньшей, чем при ее расчете по задержке между максимумами амплитуды с.л.э.п. и это различие зависит от конструкции катода.

**Измерения с субнаносекундным временным разрешением.** При субнаносекундном временном разрешении системы регистрации пучок электронов регистрировался за Al фольгой толщиной 10 мкм через отверстие в диафрагме диаметром 18 мм коллектором с диаметром приемной части 20 мм. Данный коллектор имел временное разрешение до  $\sim 80$  пс и позволял регистрировать  $\sim 30\%$  электронов от полного тока пучка. На рис. 5 приведены осциллограммы тока с.л.э.п. за фольгой



**Рис. 6.** Осциллограммы тока с.л.э.п. (1, 2) и соответствующие им осциллограммы напряжения (3, 4). Коллектор тока электронного пучка располагался за Al фольгой толщиной 470 мкм и диафрагмой диаметром 18 мм с катодом № 2 (шар). Диаметр приемной части коллектора 20 мм.

из алюминия толщиной 10 мкм для катода № 2 (шар) и импульсов напряжения с емкостного делителя. Осциллограммы тока пучка (1), (2) и (3) соответствуют осциллограммам импульсов напряжения (4), (5) и (6), соответственно. С этим катодом наблюдался наибольший разброс амплитуд импульсов напряжения и токов пучка убегающих электронов, а также две формы импульсов напряжения. Импульсы напряжения (4) и (5) не достигали своего максимального значения и имели резкий спад на фронте импульса. При импульсе напряжения (6) его амплитуда была наибольшей и на импульсе напряжения резкий спад не регистрировался. Наибольшие амплитуды с.л.э.п. за фольгой из алюминия толщиной 10 мкм существенно не отличались для импульсов с резким спадом на фронте и без него. Однако при регистрации тока пучка за толстыми фольгами с.л.э.п. при наибольших амплитудах импульса напряжения перестал регистрироваться, осциллограмма 2 на рис. 6. Из этих экспериментов следует, что ин-



**Рис. 7.** Осциллограмма тока с.л.э.п. (1) за Al фольгой толщиной 420 (катод № 1 (трубка)) и соответствующая ему осциллограмма напряжения (3); осциллограмма тока с.л.э.п. (2) за Al фольгой толщиной 530 мкм (катод № 2 (шар)) и соответствующая ему осциллограмма напряжения (4). Диаметр приемной части коллектора 56 мм.

тенсивные ионизационные процессы в промежулке, приводящие к резкому спаду напряжения, увеличивают энергию убегающих электронов.

**Измерения полного числа электронов.** Применялся коллектор с диаметром приемной части 56 мм, который позволял регистрировать со всей поверхности фольги полное число электронов тока с.л.э.п. На рис. 7 приведены осциллограммы тока пучка и напряжения, полученные с катодами № 1 и № 2 за фольгами толщиной 310 и 470 мкм, соответственно. Видно, что за “толстыми” фольгами регистрируется пучок электронов с амплитудой более 0.2 мА. Данный результат принципиально отличается от данных полученных в работе [5]. В [5] для импульса напряжения с максимальной крутизной фронта (~400 пс) и амплитудой 570 кВ на катоде при холостом ходе приведена зависимость ослабления тока убегающих электронов от толщины алюминиевого фильтра (стр. 47, рис. 17). Как сказано в [5] из этой зависимости

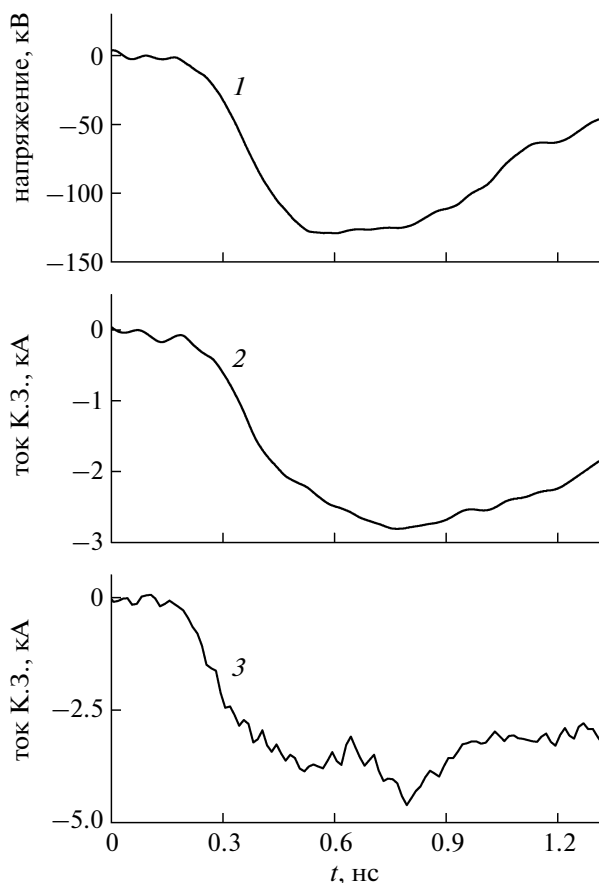


Рис. 8. Осциллограммы падающей волны напряжения (1) и тока короткого замыкания (2, 3), полученные на генераторе СЛЭП-150М (1, 2) и СЛЭП-150 (3).

следует, что полная отсечка пучка убегающих электронов имела место при толщине алюминиевого фильтра 210 мкм, и согласно оценкам максимальная энергия электронов составляет 200 кэВ. Как показано выше, с генератором СЛЭП-150 пучок убегающих электронов был зарегистрирован за фольгами толщиной 310 и 470 мкм.

Кроме того, в ряде импульсов с генератором СЛЭП-150 за фольгами толщиной 530 (с катодом № 1 (трубка)) и 640 мкм (с катодом № 2 (шар)) были получены токи пучка с меньшими амплитудами (менее 0.1 мА). Импульсы тока пучка за этими фольгами регистрировались в одном импульсе при 50–100 включениях генератора. Таким образом, в экспериментах с генератором СЛЭП-150 подтверждено, что пучки убегающих электронов регистрируются за толстыми фольгами из алюминия. Причем толщина этих фольг оказалась существенно больше, чем в экспериментах с генератором СЛЭП-150М [2, 8, 11].

Как отмечено выше, с помощью емкостного делителя генератора СЛЭП-150 нельзя точно определить амплитуду напряжения на промежутке, соответственно, полученных данных не доста-

точно для сравнения наибольших энергий электронов с энергией  $eU_m$ , где  $U_m$  – максимальное напряжение на промежутке. В дальнейшем мы продолжим нашу работу в этом направлении. Однако мы можем сравнить результаты по прохождению пучком электронов толстых фольг, полученные с генераторами СЛЭП-150 и СЛЭП-150М. В наших работах [8, 11] с генератором СЛЭП-150М путем регистрации падающей и отраженной волн напряжения с двух емкостных делителей было определено напряжение на промежутке с катодами № 1 (трубка) и № 2 (шар), которые составили 170 и 220 кВ, соответственно. Для сравнения амплитуды напряжения в падающей волне, полученной ранее с генератором СЛЭП-150М [2, 8, 11], и амплитуды в данной работе с генератором СЛЭП-150, проведены измерения тока короткого замыкания. На рис. 8 приведены импульсы тока короткого замыкания для обоих генераторов и импульс напряжения падающей волны для генератора СЛЭП-150М. Ток короткого замыкания с генератором СЛЭП-150 возрос в 1.4 раза. Соответственно при этом должна возрасти амплитуда напряжения в падающей волне генератора. Об увеличении напряжения на промежутке можно судить по увеличению энергии в максимуме основной группы электронов с катодом № 2 (шар), которая составила ~210 кэВ (см. рис. 2, рис. 4 и таблицу). В работе [11] расчет спектра на основе метода фильтров и эксперименты с пролетным спектрометром дали энергию в максимуме основной группы электронов с катодом № 2 (шар) ~150 кэВ. Увеличение в данных условиях энергии части электронов с.л.э.п. также следует из регистрации тока пучка за более толстыми, чем в экспериментах с генератором СЛЭП-150М фольгами.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе анализа результатов данной работы и результатов наших измерений, представленных в работах [2, 8, 10, 11], можно объяснить механизм генерации убегающих электронов и электронов с энергией  $T > eU_m$  следующим образом. При подаче импульсов напряжения амплитудой в сотни киловольт на промежуток достигается высокая напряженность электрического поля благодаря усилению поля на микро- и макронеоднородностях катода. Это приводит к автоэлектронной эмиссии с катода на переднем фронте импульса напряжения. Как известно, для извлечения электронов с катода за счет автоэлектронной эмиссии необходима напряженность электрического поля более  $10^7$  В/см. Эмитируемые электроны начинают ускоряться в этом усиленном электрическом поле у катода, и часть из них может приобретать энергию, достаточную для

убегания. Это связано с тем, что критическое поле для перехода значительного числа электронов в режим убегания составляет более чем на порядок меньшую величину. Согласно работам опубликованным в сборнике [13], критическое поле для убегания значительного числа электронов в однородном электрическом поле при атмосферном давлении азота и межэлектродном зазоре 0.1 мм порядка  $4 \times 10^5$  В/см. При удалении от микроострий на катоде и кромки катода напряженность электрического поля быстро уменьшается, и быстрые электроны теряют свою энергию, в основном на ионизацию частиц в прикатодной области. Появившиеся вторичные и автоэмиссионные электроны в растущем, за счет увеличения напряжения на промежутке, электрическом поле 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 развитии разряда число электронов в каждой из лавин может увеличиться без образования стримера в  $\sim 10^8$  раз (до  $N_c \approx 10^8$  электронов). Расстояние  $x_c$ , на котором лавина достигает критического размера в воздухе при атмосферном давлении и напряженности электрического поля  $\sim 100$  кВ/см, согласно  $x_c = (\ln N_c)/\alpha$ , где  $\alpha$  – коэффициент объемной ионизации, составит не более 0.2 мм. На фронте плотной плазмы, который образуют головки лавин движущихся к аноду, при этом возникает избыточный отрицательный заряд и начинает формироваться электронный пучок (с.л.э.п.). В данных условиях, как было показано ранее [9, 14], в промежутке формируется диффузный разряд. Далее электроны пучка при движении к аноду продолжают ускоряться. Число убегающих электронов при этом увеличивается за счет электронов ионизационного каскада и увеличения напряжения на промежутке. Энергия электронов также увеличивается, как вследствие увеличения напряжения на промежутке, так и для части электронов за счет эффекта поляризационного ускорения [15]. Мы считаем, что благодаря поляризационному ускорению небольшая доля электронов пучка (<10% от тока с.л.э.п.) может иметь энергию  $T > eU_m$ .

Моделирование, проведенное в работе [6] для азота и гелия, также показало, что генерация убегающих электронов идет в два этапа. На первом этапе в режим убегания переходят электроны, эмитируемые с катода, а на втором этапе электроны с границы плотной плазмы, которая экранирует катод.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования энергии электронов при генерации с.л.э.п. в воздухе атмосферного давления. Для определения энергии электронов основной группы использовался пролетный спектрометр, а оценка наибольшей энергии электронов проводилась по поглощению в фильтрах из алюминия. Показано, что конструкция катода оказывает существенное влияние на энергию основной группы электронов. С катодом в виде шара (№ 2) отдельные импульсы с.л.э.п. были зарегистрированы за Al фольгой толщиной 640 мкм (что соответствует энергии более 416 кэВ [16]), а с катодом № 1 (трубка) за Al фольгой толщиной 530 мкм (что соответствует энергии более 365 кэВ [16]).

Установлено, что генерация электронов с повышенной энергией происходит при явно выраженном спаде напряжения на промежутке. Быстрый спад напряжения на промежутке свидетельствует о развитии ионизационных процессов в промежутке, который переключается фронтом волны ионизации за время  $\sim 200$  пс. Этот результат подтверждает возможность коллективного ускорения части электронов при разрядах в газах. Данный механизм был предложен Аскарьяном [15] и развивался в работах Бабица, которые обобщены в монографии [9], и Яковленко с соавторами, см. [13]. Возможность генерации электронов с энергией, которая больше амплитуды приложенного напряжения также была показана при приборе промежутка в диэлектрических трубках в виде высокоскоростной волны ионизации [17].

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”, ГК № 02.740.11.0562 и при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00105\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабиц Л.П., Лойко Т.В.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. №. 3. С. 287.
2. *Тарасенко В.Ф.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 444.
3. *Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.* // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 77.
4. *Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2012. № 1. С. 94.
5. *Месяц Г.А., Яландин М.И., Реутова А.Г. и др.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 34.
6. *Levko D., Yatom S., Vekselman V. et al.* // J. of Appl. Phys. 2012. V. 111. 013303.
7. *Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Балзовский Е.В.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 14. С. 32.
8. *Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Burachenko A.G. et al.* // Laser and Particle Beams. 2008. V. 26. P. 605.
9. *Babich L.P.* High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Nat-



- ural Phenomena. (ISTC Science and Technology Series, V. 2) Arlington, VA: Futurepast, 2003.
10. Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г. и др. Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 12. С. 1110.
  11. Baksht E.K., Burachenko A.G., Kozhevnikov V.Yu. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. 305201.
  12. Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н. и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 69.
  13. Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе / Под ред. С.И. Яковленко. Тр. ИОФАН. М.: Наука. 2007. Т. 63.
  14. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Известия вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94.
  15. Аскарьян Г.А. // Тр. ФИАН. 1973. Т. 66. С. 66.
  16. Комар А.П., Круглов С.П., Лопатин И.В. Измерение полной энергии пучков тормозного излучения от электронных ускорителей. Л.: Наука, 1972.
  17. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филюгин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263.