

## Влияние материала катода на амплитуду сверхкороткого лавинного электронного пучка в воздухе атмосферного давления

© Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: beh@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 12 февраля 2015 г. В окончательной редакции 28 апреля 2015 г.)

С пикосекундным временным разрешением исследована генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) при субнаносекундном пробое в воздухе атмосферного давления. Измеренные в передающей линии генератора СЛЭП-150М сигналы падающей и отраженной волн напряжения позволили восстановить напряжение на межэлектродном промежутке. Установлено, что за счет увеличения напряжения на промежутке в случае конусного электрода из нержавеющей стали амплитуда СЛЭП больше, чем для таких же электродов из меди и алюминия. Показано, что при замене конусного электрода на трубчатый длительность и амплитуда СЛЭП увеличиваются.

### Введение

Материал и конструкция электродов оказывают существенное влияние на параметры сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП), который генерируется в воздухе атмосферного давления и других газах при наносекундных разрядах [1–13]. Однако систематизированные исследования влияния материала катода на амплитуду СЛЭП и на плотность рентгеновского излучения были проведены только для трубчатых катодов в работе [12]. В [12] газовые диоды заполнялись воздухом атмосферного давления и использовались импульсы высокого напряжения с различной длительностью фронта (0,3, 1 и 15 ns). Промежуток был образован плоским анодом и трубчатым катодом из различных металлов (нержавеющей стали, пермаллоя, титана, ниобия, меди, латуни и алюминия). На установке с фронтом импульса напряжения 0,3 ns было показано, что амплитуда напряжения на промежутке зависит от материала трубчатого катода и достигает наибольших значений с катодом из нержавеющей стали. Установлено, что максимальные амплитуды СЛЭП реализуются (при прочих равных условиях) при наибольших напряжениях на промежутке. Было предположено, что изменение амплитуды напряжения на промежутке достигается за счет различия в пороге электронной эмиссии с поверхности различных металлов. При фронте импульса напряжения  $\sim 1$  ns и менее амплитуда СЛЭП также увеличивалась за счет применения катодов из металла с малой работой выхода. Было показано, что на амплитуду СЛЭП влияет не только материал острой кромки трубчатого катода, но и материал его боковой поверхности.

Кроме того, в [12] было также установлено, что при увеличении фронта импульса напряжения до 15 ns и межэлектродного зазора до 8 см материал катода перестает влиять на амплитуду напряжения на промежутке. В этих условиях плотность рентгеновского излучения, измеряемая с помощью сцинтиллятора из NaI и фотомножителя, не зависела от материала катода.

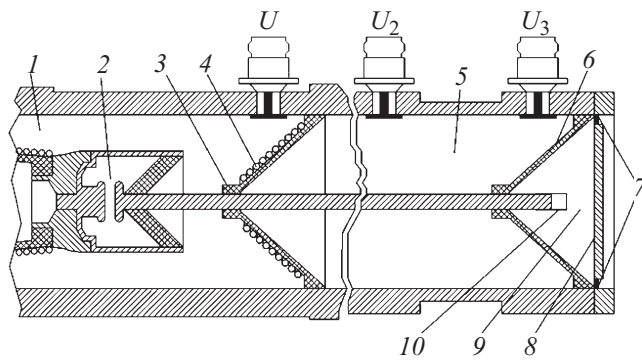
При использовании СЛЭП для изучения люминесценции кристаллов [14,15], предыонизации  $\text{CO}_2$ -лазера [16] и других приложений используются катоды разной конструкции, поэтому важно знать, как повлияет материал катода на амплитуду СЛЭП при изменении формы катода и за счет чего можно увеличивать амплитуду и длительность СЛЭП

Цель настоящей работы — исследовать влияние материала катода, изготовленного в виде конуса из алюминия, меди и нержавеющей стали, на амплитуду СЛЭП, определяя при этом амплитуду напряжения на промежутке. Кроме того, ставилась задача сравнить параметры СЛЭП при катодах в форме конуса и трубки.

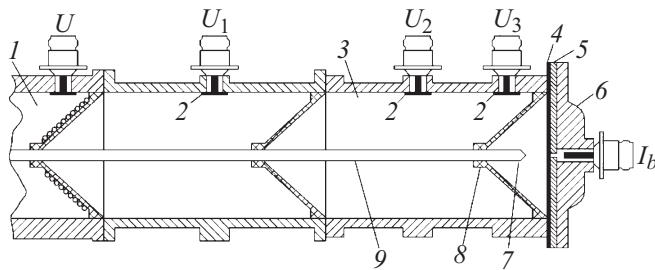
Отметим, что определение параметров СЛЭП является сложной задачей. Это связано с короткой длительностью импульса тока пучка убегающих электронов, которая зависит от многих параметров. В том числе длительность СЛЭП зависит от диаметра отверстия в коллиматоре или диафрагме за анодной фольгой, через которое пучок электронов попадает на коллектор [10]. При диаметре отверстия в коллиматоре 1 mm и менее и использовании катода из стального шара диаметром 9,5 mm в работе [17] была зарегистрирована длительность импульса СЛЭП на полувысоте 25 ps. В настоящей работе ставилась задача провести исследования и при максимально возможном временном разрешении коллектора и всей системы регистрации.

### Экспериментальная установка и методики

Эксперименты проводились на установке, состоящей из генератора СЛЭП-150М с дополнительной передающей линией [18] и газового диода. Выходная часть генератора с передающей линией, газовый диод, токовый шунт и коллектор показаны на рис. 1,2. Генератор формировал высоковольтный импульс напряжения с ам-



**Рис. 1.** Выходная часть генератора СЛЭП-150М с передающей линией, газовым диодом, трубчатым катодом и шунтом. 1 — выходная секция импульсного трансформатора, 2 — обострительный разрядник, 3 — изолятор, 4 — шунтирующая обмотка, 5 — коаксиальная передающая линия, 6 — изолятор газового диода, 7 — шунт на чип-резисторах, 8 — анод, 9 — разрядный промежуток газового диода, 10 — трубчатый катод.  $U, U_2, U_3$  — радиочастотные разъемы  $N$ -типа, соединенные с емкостными делителями напряжения.



**Рис. 2.** Выходная часть генератора СЛЭП-150М с передающей линией, газовым диодом, конусным катодом и коллектором. 1 — выходная часть генератора, 2 — емкостные делители напряжения, 3 — коаксиальная передающая линия, 4 — фольга, 5 — коллиматор, 6 — корпус коллектора, 7 — конусный катод, 8 — изолятор, 9 — внутренний проводник передающей линии.  $U, U_1, U_2, U_3, I_b$  — радиочастотные разъемы  $N$ -типа.

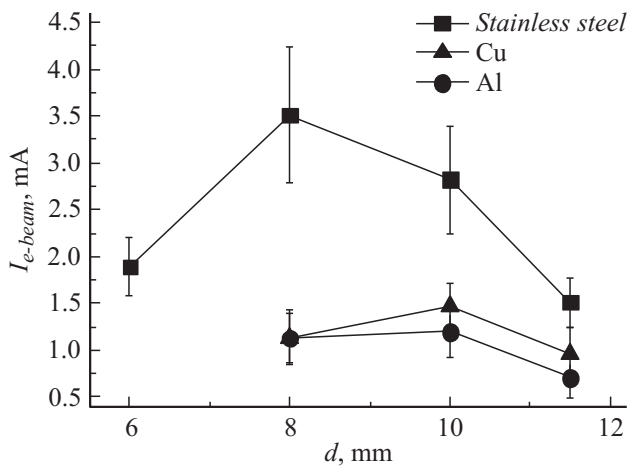
плитудой в падающей волне  $\sim 130$  kV, длительностью на полувысоте при согласованной нагрузке 1 ns и фронтом  $\sim 300$  ps. Разрядный промежуток газового диода состоял из катода и плоского анода из Al фольги толщиной  $\sim 10$   $\mu$ m. Фольга располагалась на коллиматоре с диаметром отверстия 1 mm либо на диафрагме с диаметром отверстия 2 или 7 mm. При использовании диафрагмы с диаметром отверстия 7 mm фольга поддерживалась металлической сеткой с коэффициентом пропускания по свету 18%. Коллиматор представлял собой пластину толщиной 5 mm с отверстием диаметром 1 mm в центре. В данных экспериментах регистрировалась только часть тока СЛЭП, который попадал на коллектор через фольгу и отверстие в центре коллиматора или диафрагмы. Однако при использовании коллиматора временное разрешение коллектора и системы регистрации достигало 20 ps.

Использовались конусные катоды из меди, алюминия и нержавеющей стали с углом при вершине конуса  $90^\circ$ , а также трубчатый катод диаметром 6 mm из нержавеющей стали с толщиной кромки  $\sim 200$   $\mu$ m. С использованием конусного и трубчатого катодов из нержавеющей стали измерения проводились при межэлектродном зазоре от 4 до 16 mm. При зазоре менее 6 mm происходил прорыв фольги. С конусными катодами из алюминия и меди прорыв фольги происходил за несколько импульсов и при зазоре 6 mm, поэтому с этими катодами эксперимент проводился при зазоре 8 mm и более. Максимальный межэлектродный зазор, который можно было установить в газоразрядной камере, был ограничен конструктивными особенностями газового диода и катода. Генерация СЛЭП исследовалась в воздухе атмосферного давления. Перед проведением эксперимента с каждым новым катодом проводилась его тренировка в течение 100 импульсов.

Ток пучка за Al фольгой регистрировался коллектором с диаметром приемной части 3 mm. Результаты измерений с помощью данного коллектора приведены в работах [7,10,17]. Временное разрешение коллектора было не хуже 20 ps. Напряжение на промежутке определялось с помощью двух емкостных делителей напряжения, один из которых позволял фиксировать импульс падающей волны напряжения, а другой — импульс падающей и отраженной от газового диода волны напряжения [7]. Ток разряда регистрировался шунтом с сопротивлением  $R = 0.038$   $\Omega$ , который был собран из чип-резисторов и позволял регистрировать импульсы напряжения с фронтом до 100 ps [7,10]. Импульсы тока пучка, тока разряда и напряжения подавались по коротким ( $\sim 1$  m) кабелям марки RG-58A/U на осциллограф Tektronix DPO 73304DX (33 GHz, 100 Gs/s).

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Зависимости амплитуды СЛЭП, регистрируемой через отверстие в коллиматоре диаметром 1 mm, от межэлектродного зазора при разных материалах конусного катода приведены на рис. 3. Каждая точка является усреднением по 10 импульсам. Оптимальная величина межэлектродного зазора для конусного катода из нержавеющей стали составила 8 mm, а для катодов из меди и алюминия 10 mm. Средние амплитуды импульса напряжения на промежутке, восстановленные по падающей и отраженной волнам, составили при межэлектродном зазоре 10 mm для конусного катода из нержавеющей стали  $\sim 120$  kV, а для таких же катодов из меди и алюминия  $\sim 100$  kV. Таким образом, при использовании конусного катода наибольшие токи СЛЭП реализуются при наибольших напряжениях на промежутке и катоде из стали. Это совпадает с результатами работы [12], где исследования проводились с трубчатыми катодами.



**Рис. 3.** Зависимость амплитуды тока СЛЭП от межэлектродного зазора при разных материалах конусного катода. Разряд в воздухе атмосферного давления. Диаметр отверстия коллиматора  $\sim 1$  mm.

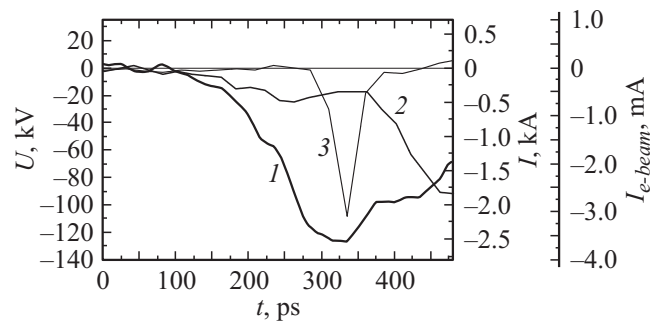
Однако в отличие от результатов с трубчатым катодом [17] с конусным катодом межэлектродный зазор не оказал существенного влияния на длительность импульса СЛЭП на полувысоте. Длительность осциллограммы импульса тока пучка была больше предельного временного разрешения системы регистрации и составила  $\sim 30$  ps на полувысоте (усреднение по 10 импульсам). Отличительной особенностью конусного катода является формирование при подаче на промежуток импульса напряжения от генератора СЛЭП-150 явно выраженного катодного пятна на вершине конуса.

На рис. 4, 5 приведены осциллограммы импульсов напряжения на промежутке 1, тока через промежуток 2 и тока 3 при использовании конусного и трубчатого катода из нержавеющей стали. Так как после первых 500 ps восстановление импульса напряжения существенно усложнялось, то осциллограммы напряжения на промежутке и тока через промежуток приведены для первых 500 ps. Эти осциллограммы синхронизованы во времени с пикосекундной точностью. Напряжение на промежутке было восстановлено по осциллограммам падающей и отраженной волн напряжения. Данная методика использовалась нами ранее в работах [7,10,12]. Ток через промежуток во время первых  $\sim 50$  ps после подачи импульса напряжения на промежуток обусловлен емкостным током „холодного“ диода (диода без плазмы). Далее после образования у катода плазмы с плотностью, достаточной для вытеснения из нее электрического поля, фронт плотной плазмы быстро продвигается к плоскому аноду. В этот отрезок времени (примерно от 50 до 350 ns) ток в части промежутка, которая заполнена плотной плазмой, обусловлен током проводимости. В оставшейся части промежутка ток через него является емкостным током сжимающегося конденсатора, образованного фронтом плотной плазмы и анодом [19]. После замыкания про-

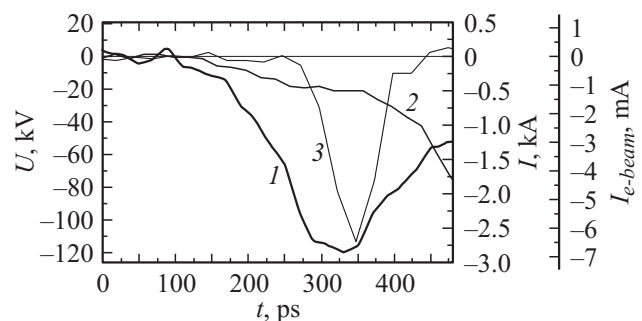
межутка плотной плазмой, что происходит для условий на рис. 4 примерно через 350 ps после подачи импульса напряжения, основным током через весь промежуток является ток проводимости. Отметим, что максимум амплитуды СЛЭП примерно соответствует началу тока проводимости через промежуток.

В настоящей работе из-за применения коллиматора или диафрагм регистрировалась только часть тока пучка за анодом. Амплитуда полного тока СЛЭП за анодной фольгой и сеткой с прозрачностью 90% с трубчатым катодом составляла  $\sim 10$  А при длительности импульса на полувысоте  $\sim 100$  ps. Длительность импульса тока электронного пучка и его амплитуда при регистрации за всей поверхностью анодной фольги больше, чем при регистрации СЛЭП за отверстием в коллиматоре, см. рис. 4, 5 и осциллограммы в работах [6,10,18].

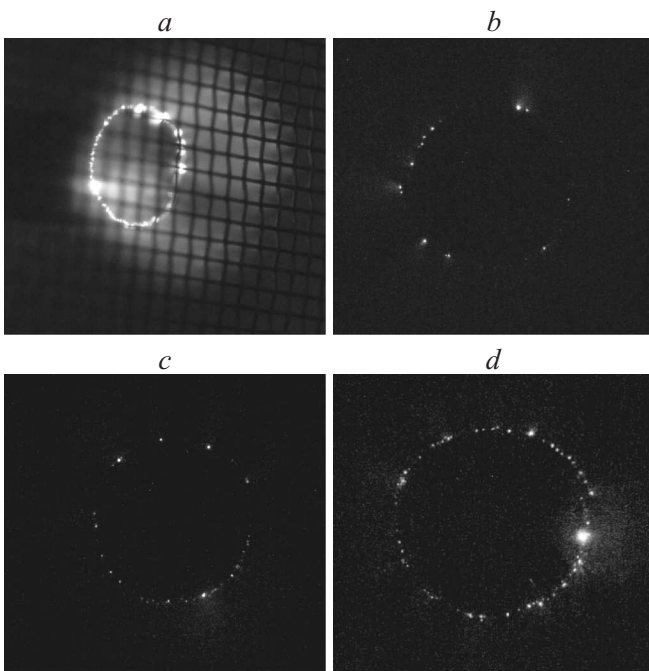
Напряжения на промежутке для конусного и трубчатого катодов существенно не отличаются, и для условий на рис. 4, 5 составляют 127 и 120 kV соответственно. Максимальные значения тока разряда, которые достигаются через  $\sim 700$  ns, для обоих катодов были одинаковы



**Рис. 4.** Восстановленное напряжение на промежутке 1, ток через межэлектродный промежуток 2 и ток СЛЭП 3 при межэлектродном зазоре  $d = 10$  mm. Конусный катод из нержавеющей стали. Напряжение на промежутке 1 и ток через промежуток 2 синхронизованы. Диаметр отверстия в коллиматоре  $\sim 1$  mm.



**Рис. 5.** Восстановленное напряжение на промежутке 1, ток через межэлектродный промежуток 2 и ток СЛЭП 3 при межэлектродном зазоре  $d = 10$  mm. Трубчатый катод из нержавеющей стали. Напряжение на промежутке 1 и ток через промежуток 2 синхронизованы. Диаметр отверстия в коллиматоре  $\sim 1$  mm.



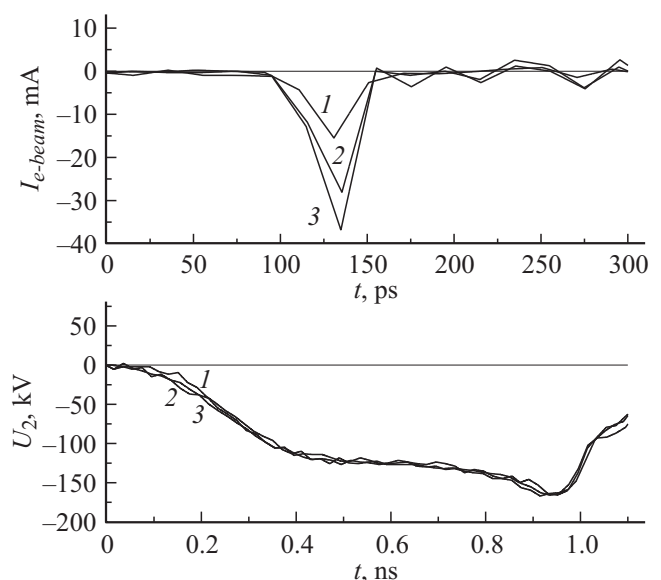
**Рис. 6.** Фотография свечения промежутка (снята под углом к центральной оси газового диода), полученная за 5 импульсов при  $d = 12$  мм (а), и фотографии катодных пятен при межэлектродных зазорах  $d = 12$  (б), 8 (с) и 4 мм (д), полученные за 1 импульс при съемке через сетчатый анод и использовании в генераторе СЛЭП-150М срезающего разрядника. Трубочатый катод диаметром 6 мм из нержавеющей стали.

(2.6 кА). В данных условиях (рис. 4, 5) импульсы тока пучка измерялись за коллиматором с диаметром отверстия 1 мм. Длительность осциллограммы импульса тока СЛЭП в приведенных осциллограммах с трубчатом катодом составила на полувысоте 56 ps, с конусным — 26 ps, амплитуды — 6.5 и 3 мА соответственно. Регистрация больших амплитуд тока пучка с трубчатым катодом подтверждает результаты работы [1], где СЛЭП регистрировался дисковым коллектором за всей поверхностью анодной фольги. Увеличение амплитуды тока пучка связано с увеличением длины острой кромки катода, имеющей малый радиус кривизны. При большей длине острой кромки катода на ней появляется больше катодных пятен, число которых увеличивается при уменьшении межэлектродного зазора.

На рис. 6 показаны фотографии свечения разряда в межэлектродном промежутке, а также фотографии катодных пятен на острой кромке трубчатого электрода. При съемке катодных пятен за счет использования срезающего разрядника длительность импульса генератора СЛЭП-150М была уменьшена до 200 ps. Применение трубчатого катода, на котором наблюдается большее число катодных пятен, приводит к увеличению длительности и амплитуды импульса СЛЭП по сравнению с данными, полученными при использовании конусного катода. Наибольшие амплитуды тока пучка за фольгой в

воздухе атмосферного давления достигаются при оптимальных конструкциях катода и газового диода, а также при оптимальном межэлектродном зазоре [10]. С трубчатым катодом диаметром 6 мм из нержавеющей стали оптимальный межэлектродный зазор составил 12 мм [3].

На рис. 7 приведены осциллограммы тока СЛЭП и напряжения с емкостного делителя  $U_2$ , полученные с конусным катодом из нержавеющей стали при различных диаметрах отверстия диафрагмы или коллиматора, ограничивающего пучок, попадающий на коллектор. Осциллограммы импульсов напряжения с емкостного делителя  $U_2$  представляют собой наложение падающей и смещенной по времени отраженной волн напряжения и приведены для импульсов тока СЛЭП (1), (2) и (3), соответствующих различным диаметрам ограничивающего пучок отверстия. Импульсы напряжения не синхронизованы во времени с осциллограммами тока пучка. С конусным электродом увеличение диаметра отверстия, ограничивающего пучок, до 7 мм не дало заметного увеличения длительности импульса СЛЭП. Длительность СЛЭП на полувысоте составила  $\sim 26$  ps, тогда как с трубчатым электродом длительность СЛЭП при увеличении отверстия, ограничивающего пучок, увеличивалась и при диаметре отверстия 7 мм составила  $\sim 60$  ps на полувысоте. Это можно объяснить сферической формой фронта плотной плазмы, который распространяется от острия конуса, и генерацией основной части убегающих электронов с границы фронта плотной плазмы. В случае, когда диаметр приемной части коллектора составляет 3 мм, число электронов пучка,

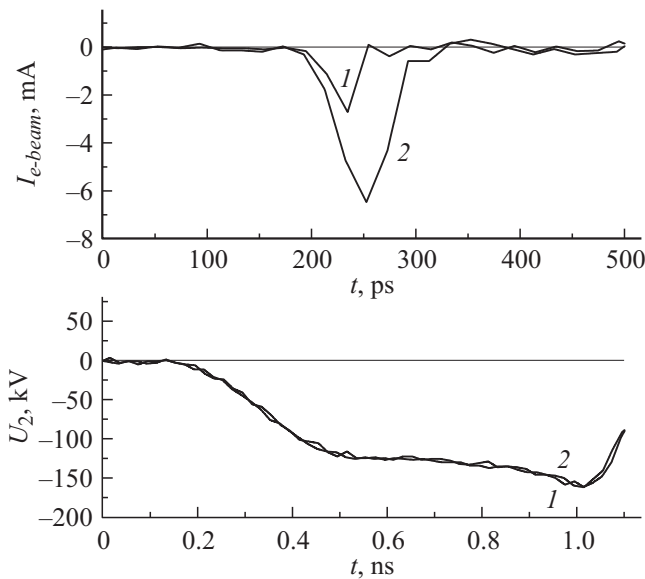


**Рис. 7.** Осциллограммы тока СЛЭП за коллиматором с диаметром отверстия 1 мм (1), а также за диафрагмой диаметром 2 (2) и 7 мм (3) и соответствующие им импульсы напряжения с емкостного делителя  $U_2$ . Осциллограмма тока пучка 1 увеличена в 5 раз, а осциллограмма тока пучка 3 ослаблена сеткой с коэффициентом пропускания 18%. Конусный катод из нержавеющей стали. Межэлектродный зазор  $d = 10$  мм.

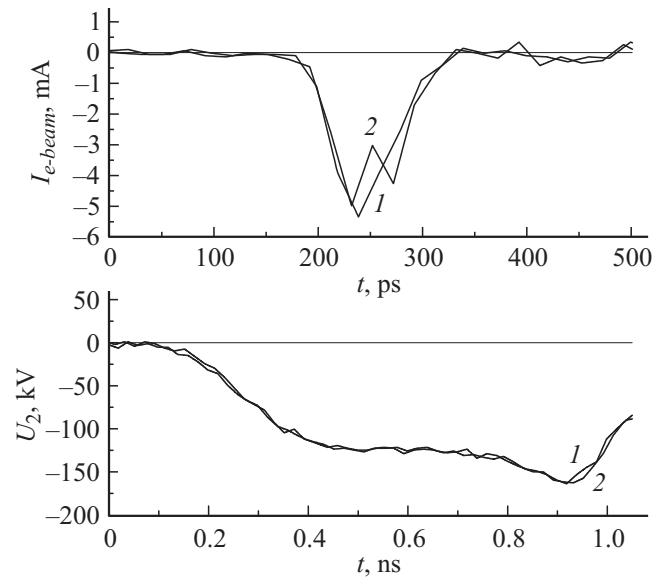
попавших на коллектор, увеличивается при увеличении диаметра отверстия, ограничивающего пучок. Однако основная часть электронов, попадающая на коллектор, генерируется в центральной части сферы. Соответственно эти электроны и определяют длительность импульса СЛЭП.

Осциллограммы тока пучка с конусным и трубчатыми катодами при одинаковых импульсах напряжения генератора приведены на рис. 8. Видно увеличение амплитуды и длительности импульса СЛЭП для трубчатого катода. На рис. 8 для тех же импульсов тока СЛЭП (1) и (2) приведены импульсы напряжения с емкостного делителя  $U_2$  (рис. 2), которые представляют собой наложение падающей и смещенной по времени отраженной волны напряжения. Осциллограммы тока пучка и напряжения не синхронизованы во времени.

В случае трубчатого катода от его острой кромки, на которой появляется несколько катодных пятен, распространяется фронт плотной плазмы, который состоит из нескольких струй. Эти струи могут перекрываться, особенно при уменьшении давления и в легких газах. Генерация убегающих электронов с границы плотной плазмы в разных струях приводит к попаданию в ограничивающее пучок отверстие электронов пучка из разных участков фронта волны ионизации. Это увеличивает длительность и амплитуду импульса СЛЭП при использовании трубчатого катода (рис. 8). Данный механизм генерации убегающих электронов подтверждают импульсы СЛЭП, полученные с трубчатым катодом при межэлектродном зазоре 15 мм (рис. 9). В этих условиях регистрировались как импульсы тока пучка с одним



**Рис. 8.** Осциллограммы тока СЛЭП за коллиматором с диаметром отверстия 1 мм с конусным (1) и трубчатым катодом (2) из нержавеющей стали и соответствующие им импульсы напряжения с емкостного делителя  $U_2$ . Межэлектродный зазор  $d = 10$  мм.



**Рис. 9.** Осциллограммы тока СЛЭП с одним (1) и двумя пиками (2) за коллиматором с диаметром отверстия 1 мм для трубчатого катода из нержавеющей стали и соответствующие им импульсы напряжения с емкостного делителя  $U_2$ . Межэлектродный зазор  $d = 15$  мм.

пиком, так и с двумя. Формирование нескольких пиков на осциллограмме СЛЭП объясняется неодновременностью в ряде импульсов формирования плазмы и катодных пятен по длине острой кромки трубчатого катода. В этих условиях генерация убегающих электронов с границы плотной плазмы может происходить неодновременно, соответственно в ряде импульсов регистрируется несколько пиков на осциллограмме СЛЭП.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что при изготовлении катодов в виде конуса наибольшие амплитуды СЛЭП при фронте импульса напряжения 300 пс реализуются с катодами из нержавеющей стали по сравнению с катодами из меди и алюминия. Установлено, что применение нержавеющей стали увеличивает напряжение пробоя промежутка во время генерации СЛЭП. Считаем, что при изготовлении катода из нержавеющей стали увеличение напряжения на промежутке достигается за счет уменьшения эмиссии электронов во время иницирования разряда. Для увеличения амплитуды СЛЭП на данной установке при прочих равных условиях надо задерживать эмиссию электронов с катода и тем самым увеличивать напряжение на промежутке во время генерации пучка убегающих электронов. В данных экспериментах напряжение на промежутке при заполнении его элегазом в режиме холостого хода генератора достигало 260 кВ, а максимальное напряжение при генерации СЛЭП в воздухе атмосферного давления не превышало 150 кВ. Можно ожидать увеличение амплитуды СЛЭП

за счет роста напряжения на промежутке при использовании катода из платины, работа выхода которой существенно больше (5.29 eV [20]), чем у нержавеющей стали, а также при сокращении длительности фронта импульса напряжения генератора СЛЭП-150М.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

## Список литературы

- [1] *Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M.* // Laser and Particle Beams. 2004. Vol. 22. P. 75–82.
- [2] *Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Костыря И.Д., Орловский В.М.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 69–74.
- [3] *Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D.* // Laser and Particle Beams. 2005. Vol. 23. P. 545–551.
- [4] *Месяц Г.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 4. С. 71–80.
- [5] *Мастюгин Д.С., Осипов В.В., Соломонов В.И.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 10–17.
- [6] *Костыря И.Д., Бакиит Е.Х., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2010. № 4. С. 84–87.
- [7] *Тарасенко В.Ф.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 444–457.
- [8] *Бойченко А.М., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 8. С. 142–149.
- [9] *Яландин М.А., Месяц Г.А., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 8. С. 56–65.
- [10] *Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ПТЭ. 2012. № 1. С. 80–85.
- [11] *Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F.* // Int. Rev. Phys. 2012. Vol. 6. N 2. P. 165–195.
- [12] *Zhang Ch., Tarasenko V.F., Shao T., Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Yan P., Kostyrya I.D.* // Laser and Particle Beams. 2013. Vol. 31. P. 353–364.
- [13] *Лисенков В.В., Шкляев В.А.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 43–49.
- [14] *Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 21. С. 102–110.
- [15] *Тарасенко В.Ф., Соломонов В.И., Полисадова Е.Ф., Бураченко А.Г., Бакиит Е.Х.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 5. С. 144–149.
- [16] *Орловский В.М., Алексеев С.Б., Тарасенко В.Ф.* // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 11. С. 1033–1036.
- [17] *Tarasenko V.F., Rybka D.V., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Balzovsky E.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. 086 106.
- [18] *Tarasenko V.F., Kostyrya I.D., Baksh E.K., Rybka D.V.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2011. Vol. 18. N 4. P. 1250–1255.
- [19] *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang Ch., Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksh E.Kh., Yan P.* // Rev. Sci. Instrum. 2013. Vol. 84. 053 506.
- [20] *Michaelson H.B.* // J. Appl. Phys. 1950. Vol. 21. P. 536–540.