

03;04;10;12

Генерация субнаносекундных импульсов убегающих электронов в азоте и гелии при напряжении на промежутке 25 kV

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

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

(Поступило в Редакцию 17 апреля 2007 г.)

Экспериментально исследовано формирование пучка убегающих электронов в гелии и азоте при напряжении генератора ~ 25 kV. Показано, что при малых напряжениях генератора сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) генерируется на плоской части импульса напряжения, а время его запаздывания относительно фронта импульса напряжения может составлять десятки наносекунд. Показано, что в зависимости от давления в газовом диоде реализуются различные режимы генерации пучка убегающих электронов, при этом длительность тока пучка на полувысоте изменяется от ~ 200 ps до нескольких наносекунд. Получены распределения электронов пучка по энергиям при различных давлениях. Показано, что при предыонизации промежутка от дополнительного источника условия генерации СЛЭП нарушаются.

PACS: 42.60.Jf

Введение

Проблеме генерации убегающих электронов в газах повышенного давления посвящено большое количество работ. Особый интерес представляют работы, в которых электронный пучок при давлении в разрядном промежутке ~ 760 Torr регистрировался за фольгой [1–8]. В этих работах на газоразрядный промежуток подавались импульсы напряжения с амплитудой более 100 kV. Электронный пучок был получен как на переднем [1], так и на заднем [2] фронте импульса напряжения во время увеличения проводимости промежутка. В работах, выполненных в последние годы (см. обзор [3], статьи [4–8] и ссылки в них), амплитуды тока пучка за фольгой при атмосферном давлении в газовых диодах были значительно увеличены. Последние наши измерения показывают, что амплитуда тока пучка убегающих электронов, генерируемого в воздухе атмосферного давления при трубчатом катоде диаметром 6 mm и генераторе РАДАН-220, составляет ~ 50 A. Длительность импульса тока сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) на полувысоте при этом не превышает 0.1 ns [5]. Представляет интерес исследовать возможность получения СЛЭП за тонкими фольгами при малых напряжениях на промежутке ~ 25 kV. Наши первые эксперименты, проведенные в этом направлении, опубликованы в [9].

Отметим, что рентгеновское излучение при напряжениях в десятки киловольт и давлениях в промежутке 760 Torr гелия и воздуха регистрировалось за фольгами разной толщины во многих работах [10–13]. Известны также работы [14,15] по получению пучков убегающих электронов за сетчатым анодом. В этих работах пучок электронов генерировался при сравнительно низких давлениях (единицы–десятки Torr), применялись импульсы напряжения в единицы киловольт и малые межэлек-

тродные промежутки (~ 1 mm и менее). Однако область напряжений, составляющих десятки киловольт, давлений в десятки–сотни Torr и зазоров ~ 1 cm, применительно к генерации пучка убегающих электронов и измерения его параметров до сих пор остается неисследованной.

Цель настоящей работы — исследовать параметры пучка убегающих электронов в азоте и гелии при малом напряжении на промежутке ~ 25 kV и определить в этих условиях время запаздывания генерации пучка и его длительность, а также энергетический спектр.

Экспериментальная установка и методики измерений

Экспериментальная установка состояла из импульсного кабельного генератора [16] и разрядной камеры [17] (рис. 1). Генератор формировал на катоде импульсы напряжения амплитудой ~ 25 kV, длительностью от 20

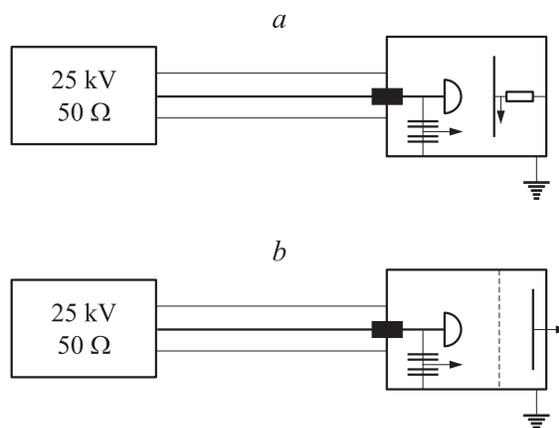


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *a* — измерение тока разряда; *b* — измерение тока электронного пучка.

до 90 ns и временем нарастания ~ 5 ns. Отраженные от газового диода импульсы поглощались в генераторе. Внутренний диаметр камеры равнялся ≈ 50 mm. Использовались две конфигурации электродов. Конфигурация электродов 1 была образована плоским анодом и выпуклым катодом из нержавеющей стали с магниевым напылением. Диаметр катода равнялся 20 mm, радиус кривизны — 12 mm. Конфигурация электродов 2 была образована плоским анодом и катодом с малым радиусом кривизны, что приводило к значительному усилению электрического поля у катода. Катод с малым радиусом кривизны был выполнен в виде трубки диаметром ~ 5 mm из титановой фольги толщиной $50 \mu\text{m}$. Конструкция разрядной камеры приведена в работе [17]. Для измерения тока разряда плоский анод был соединен с корпусом камеры через шунт (рис. 1, *a*), состоящий из 60 пленочных чип-резисторов с величиной сопротивления 3.3Ω каждый. При регистрации пучка убегающих электронов анод был выполнен из металлической сетки с прозрачностью 64%, за которой помещались металлизированная (слой алюминия толщиной $0.2 \mu\text{m}$) пленка из кимфоли ($\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$) толщиной $2 \mu\text{m}$ или фольга из алюминия толщиной $3 \mu\text{m}$. Для определения энергетического спектра убегающих электронов использовался метод фольг. При этом кроме пленки из кимфоли использовались также лавсановые пленки различной толщины. Поток электронов в плоскости сетки ограничивался медной диафрагмой диаметром 20 mm. Расстояние между катодом и анодом обычно составляло 6 mm (конфигурация электродов 1) или 12 mm (конфигурация электродов 2). За анодом из сеток с фольгой на расстоянии 9 mm устанавливали коллектор (рис. 1, *b*) с временным разрешением не хуже 0.1 ns.

Ряд экспериментов проводился с подсветкой разрядного промежутка излучением барьерного разряда. При подаче импульса высокого напряжения на катод барьерный разряд зажигался между катодом и поверхностью двух кварцевых трубок с внешним диаметром 5 mm, внутри которых помещалась медная фольга. Кварцевые трубки размещались параллельно с двух сторон катода, а медная фольга соединялась с корпусом газового диода. В ходе экспериментов регистрировались напряжение на электродах и ток разряда, а также напряжение на электродах и ток электронного пучка в гелии или азоте при разном давлении газов. Для регистрации электрических сигналов применялись осциллографы TDS-6604 с полосой 6 GHz при 20 Gs/s и TDS-3054B с полосой 0.5 GHz при 5 Gs/s.

Результаты экспериментов

Эксперименты были проведены при заполнении камеры гелием либо азотом при давлении 1–760 Torr. При подаче на межэлектродный промежуток импульса напряжения амплитудой 25 kV и длительностью 90 ns промежуток пробивался, и в зависимости от давления

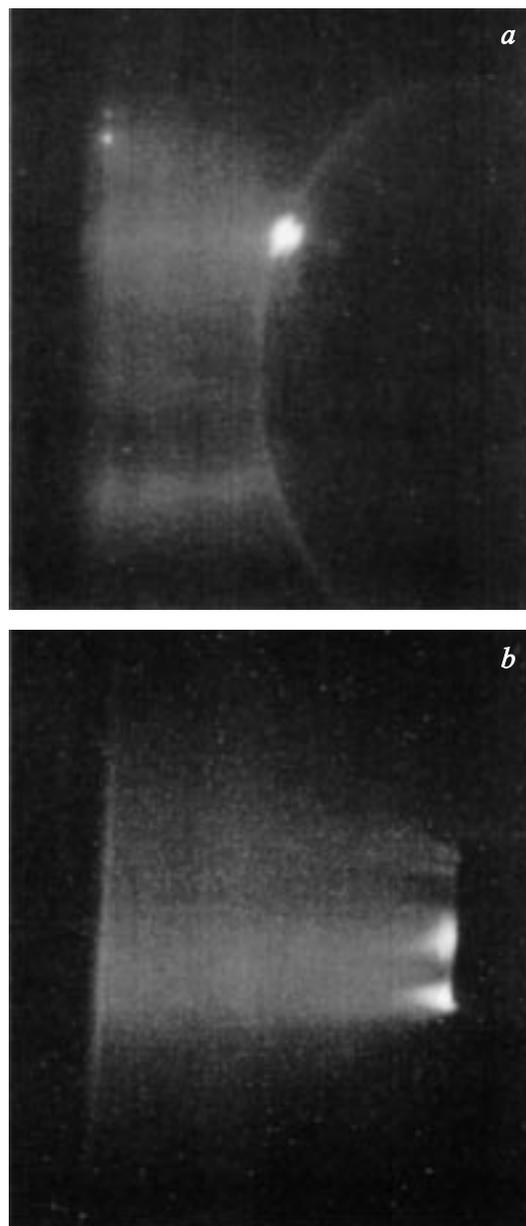


Рис. 2. Интегральные фотографии свечения разряда. Длительность импульса напряжения — 20 ns; *a* — закругленный катод; *b* — трубчатый катод.

газа формировался объемный либо контрагированный разряд. Но даже в случае контракции в начальный период горения разряда всегда присутствовала объемная фаза. Это подтверждается тем, что при подаче на разрядный промежуток импульса напряжения длительностью ~ 20 ns формировался объемный разряд (рис. 2).

Характерные осциллограммы тока и напряжения разряда представлены на рис. 3. Время запаздывания пробоя в отсутствие внешней предьонизации изменялось случайным образом и могло составлять десять и более наносекунд. Время запаздывания пробоя увеличивалось при повышенных давлениях, а также при давлении в

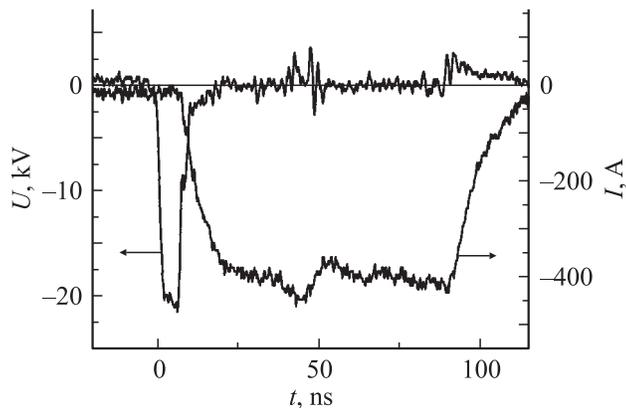


Рис. 3. Ток разряда в гелии и напряжение на электродах для конфигурации электродов 1 в отсутствие подсветки. Давление гелия 300 Торг.

единицы Торг и менее. Предыонизация промежутка стабилизировала запаздывание пробоя. Так, при давлении гелия 760 Торг это запаздывание составило $\sim 4\text{--}5$ ns. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на про-

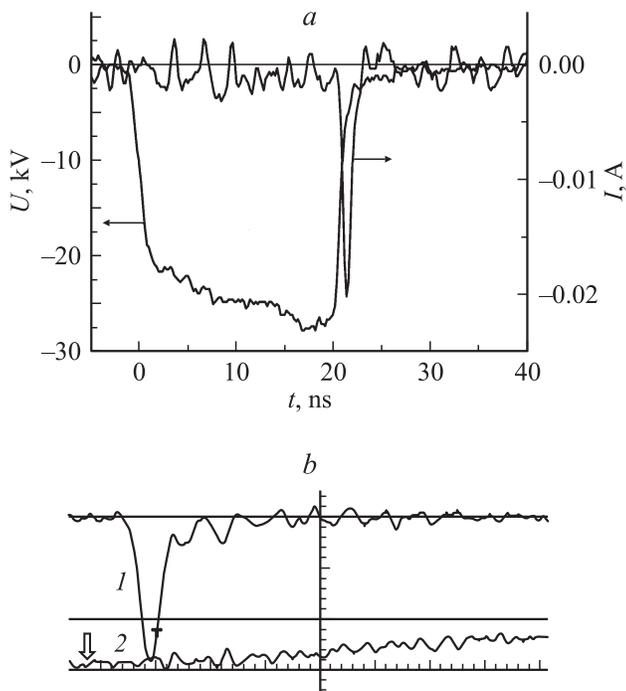


Рис. 4. *a* — ток электронного пучка в гелии и напряжение на электродах для конфигурации электродов 1 в отсутствие подсветки. Давление гелия 600 Торг. *b* — осциллограммы импульсов СЛЭП (*1*) и напряжения на промежутке (*2*) для конфигурации электродов 2. Задержка тока пучка относительно импульса напряжения ~ 0.35 ns. Давление гелия 736 Торг. Масштаб по горизонтали 0.5 ns/div, масштаб по вертикали для напряжения 25 kV/div, для тока пучка 0.008 A/div. Стрелка на рис. 4, *b* показывает амплитуду импульса напряжения относительно нулевой линии.

межутке составляло менее 1 ns (рис. 4, *a*). При этом изменение напряжения на промежутке зависело от давления газа. При повышенных давлениях уменьшение напряжения во время генерации СЛЭП не превышало 10–20% (рис. 4, *b*).

При проведении экспериментов было зарегистрировано несколько режимов генерации пучка убегающих электронов, которые зависели от давления и сорта газа, а также от геометрии промежутка. При этом для азота и гелия и для конфигураций электродов 1 и 2 с уменьшением давления режим генерации убегающих электронов меняется практически одинаково, отличие состоит только в разных диапазонах по давлению для различных газов и конфигураций электродов. Все режимы генерации пучка регистрировались коллектором после прохождения электронами металлизированной пленки кимфоли или алюминиевой фольги.

Опишем вначале изменение режимов для гелия. Для конфигурации электродов 1 (величина межэлектродного зазора $d = 6$ mm) в области давления гелия $600 \geq p \geq 300$ Торг реализуется режим генерации СЛЭП [4]. Длительность тока СЛЭП на полувысоте составляет ~ 200 ps (~ 400 ps по основанию). Такой же режим генерации электронного пучка реализуется для конфигурации электродов 2 (величина межэлектродного зазора $d = 12$ mm) в диапазоне давлений $760 \geq p \geq 150$ Торг. Отметим, что длительность СЛЭП на полувысоте в данных условиях (напряжение на промежутке ~ 25 kV) оказалась больше, чем при подаче на этот же газовый диод импульса напряжения в сотни киловольт [5–8].

В области давлений гелия $p \leq 300$ Торг реализуется один из следующих вариантов:

а) генерируется электронный пучок большой длительности (осциллограммы тока пучка имеют разнообразную форму, как правило, это импульс с одним или двумя максимумами длительностью по основанию $\sim 1.5\text{--}3$ ns и более);

б) генерируется СЛЭП;

с) реализуется смешанный режим — комбинация из первых двух режимов генерации электронного пучка, причем импульс тока СЛЭП может находиться как в начале, так и в конце импульса тока пучка большей длительности.

На рис. 5 приведена одна из редко встречающихся осциллограмм тока пучка убегающих электронов, соответствующая генерации двух пиков СЛЭП на фоне электронного пучка большой длительности. Второй импульс тока СЛЭП генерируется с задержкой 1.5 ns относительно первого.

Амплитуда тока СЛЭП при изменении давления гелия колебалась в широких пределах, достигая при давлении 180 Торг максимального значения $\sim 0.1\text{--}0.2$ А. Реальная амплитуда тока значительно больше, так как нами не учитывалось поглощение пучка сеткой, малый диаметр коллектора и потери на диафрагме. Однако по сравнению с амплитудой пучка при напряжении в

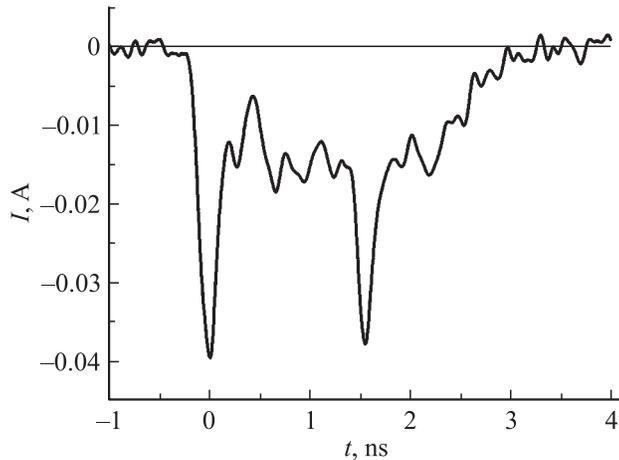


Рис. 5. Ток электронного пучка в гелии для конфигурации электродов 2. Давление гелия 90 Торг.

сотни киловольт амплитуда СЛЭП уменьшилась на два–три порядка. Для конфигурации электродов 2 также наблюдались смешанный и другие варианты режимов генерации при давлении $p \leq 150$ Торг (величина межэлектродного зазора $d = 12$ мм). При уменьшении давления гелия (60 Торг и менее) разряд загорался уже не в межэлектродном промежутке, а между основанием катодного штока, на котором крепился катодный электрод, и стенками камеры. Поэтому в таких условиях измерения не проводились. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке во всех режимах составляло менее 1 ns.

Для азота (конфигурация электродов 1, величина межэлектродного зазора $d = 6$ мм) при регистрации пучка убегающих электронов наблюдалась подобная картина: в области давлений 60–120 Торг регистрировался СЛЭП, при давлении $p \leq 30$ Торг — наблюдались различные режимы генерации электронного пучка; при давлении $p \leq 6$ Торг разряд загорался уже не в межэлектродном промежутке, а между основанием катодного штока, на котором крепился катодный электрод, и стенками камеры. Амплитуда тока электронного пучка при изменении давления азота также колебалась в широких пределах. Максимальные значения тока СЛЭП за пленой из кимфоли — ~ 0.2 – 0.3 А — регистрировались при давлении азота 30–60 Торг. Для конфигурации электродов 2 (величина межэлектродного зазора $d = 12$ мм) в области давлений ~ 10 – 200 Торг наблюдался СЛЭП, а при давлении $p \leq 6$ Торг наблюдались различные режимы генерации электронного пучка. Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке, как и для разряда в гелии, составляло менее 1 ns.

При прохождении электронного пучка через сетчатый анод в отсутствие разделительной пленки или фольги на осциллограмме тока пучка можно наблюдать два

импульса тока (рис. 6, *a*). Они наблюдаются при зажигании разряда в гелии и в азоте с конфигурациями электродов 1 и 2, чаще всего при давлениях, близких к минимальным давлениям диапазона, в котором реализуется только режим СЛЭП. При дальнейшем уменьшении давления два импульса тока сливаются в один импульс с двумя максимумами (рис. 6, *c*), а хвост импульса тока пучка тянется практически до конца импульса напряжения при малом значении напряжения на разрядном промежутке. Измерение распределения электронов по энергиям показало, что первый импульс тока электронного пучка соответствует СЛЭП, а второй импульс состоит из электронов со средней энергией менее 3 keV (рис. 7). При прохождении через металлизированную пленку из кимфоли электроны второго импульса тока пучка практически полностью в ней поглощались, и на коллекторе фиксировался только импульс СЛЭП.

Распределения электронов СЛЭП по энергиям в гелии и азоте приведены соответственно на рис. 7 и 8. Максимальное количество электронов пучка имеет энергию ~ 10 keV для гелия и ~ 12.5 keV — для азота.

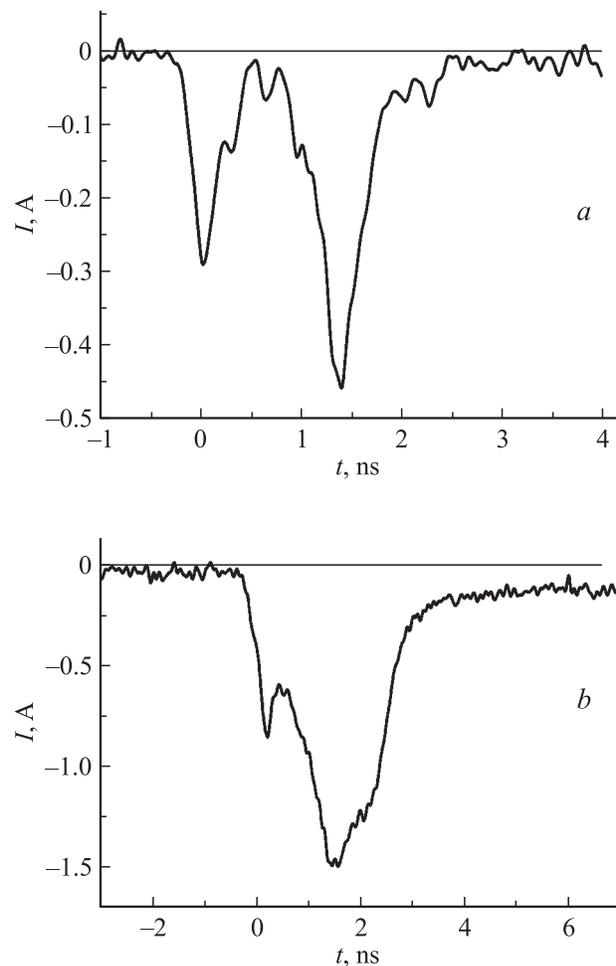


Рис. 6. Ток электронного пучка в гелии для конфигурации электродов 2. Давление гелия: *a* — 300, *b* — 15 Торг.

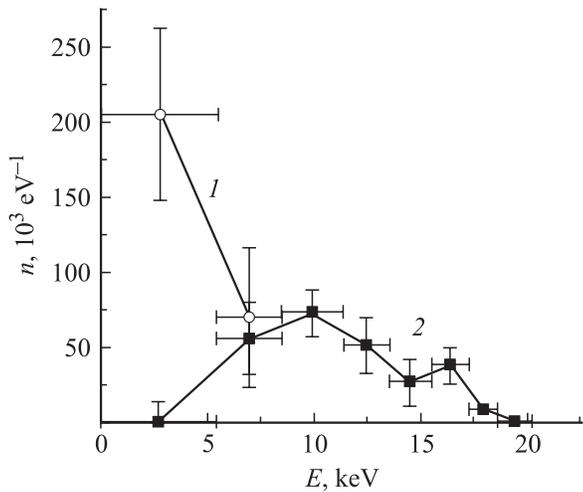


Рис. 7. Распределение убегающих электронов по энергиям в гелии при давлении 300 Торг для второго импульса электронного пучка (1) и для СЛЭП (2).

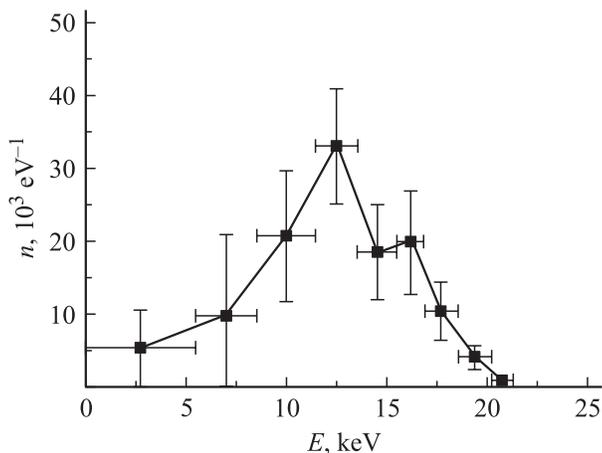


Рис. 8. Распределение электронов СЛЭП по энергиям в азоте при давлении 60 Торг.

Эксперименты с подсветкой межэлектродного промежутка (конфигурация электродов 1, величина межэлектродного зазора $d = 6$ mm) излучением барьерного разряда показали, что она влияет на генерацию убегающих электронов. Так, при давлении гелия 600 Торг и подсветке межэлектродного промежутка электронный пучок за анодом отсутствовал. В условиях подсветки промежутка электронный пучок за анодом отсутствовал также в азоте при давлении 120 Торг. Такое влияние подсветки на генерацию СЛЭП можно объяснить отсутствием необходимой для генерации СЛЭП волны ионизации [3]. При использовании подсветки концентрация электронов в промежутке увеличивается более равномерно, и критическое поле, необходимое для режима убегания, у анода при повышенных давлениях гелия и азота не достигается.

Обсуждение результатов

На основании проведенных экспериментальных исследований можно дать следующее объяснение наблюдаемым режимам формирования пучка электронов в газовом диоде при напряжении на промежутке ~ 25 kV. При малых давлениях гелия и азота значение параметра $E/p = U/dp$ на всей длине промежутка или в большей его части достигало критического значения E_{cr} для формирования пучков убегающих электронов, где U — напряжение на промежутке, d — величина межэлектродного зазора, p — давление газа. Для определения значения E_{cr}/p мы использовали верхние ветви кривой Яковленко [18]. Соответственно при напряжении на промежутке, достаточном для достижения E_{cr}/p , и наличии эмиссии электронов из катода генерировался электронный пучок, длительность которого может составлять единицы–десятки наносекунд. Так, на рис. 6, b в переходном режиме длительность тока пучка составила ~ 3 ns, и эта длительность увеличивалась при уменьшении давления. Отметим, что максимальные значения E/p при генерации пучка электронов в гелии, полученные в работе [14], также соответствовали верхней ветви кривой Яковленко.

При повышенных давлениях гелия (150–760 Торг) и азота (30–200 Торг) средние значения E/p для конфигурации электродов 2 были < 0.14 kV/(cm · Торг) для гелия и < 0.7 — для азота, что существенно ниже, чем необходимо для формирования пучков убегающих электронов в однородном электрическом поле (см. [18]). За счет усиления электрического поля на макро- и микро неоднородностях катода критическое поле достигается только вблизи катода. В этих условиях формирование пучков субнаносекундной длительности можно объяснить только на основе предложенного в [4] механизма. Согласно этому механизму, СЛЭП формируется в прианодной области между фронтом волны ионизации, распространяющейся от катода к аноду, и анодом. При этом длительность импульса СЛЭП ограничена выравниванием электрического поля в промежутке после прихода на анод волны ионизации. Отметим, что генерация быстрых электронов у катода необходима при формировании СЛЭП для появления и распространения волны ионизации [3], а также для формирования объемного разряда. В [6] предполагалось, что газовый пробой может быть фактором, только ограничивающим длительность инжектируемого пикосекундного пучка в газовом диоде. Однако, как показывают измерения в данных условиях, напряжение на промежутке во время генерации пучка при повышенных давлениях существенно не изменяется, а пучок имеет субнаносекундную длительность.

Более того, в переходной области давлений может регистрироваться несколько субнаносекундных пиков на токе пучка. Наличие двух пиков на осциллограмме тока пучка (см. рис. 5) можно объяснить формированием двух волн ионизации с различной концентрацией плазмы в них. Приход каждой волны ионизации к аноду приводит

к генерации СЛЭП. Две волны ионизации при разрядах в длинных трубках ранее наблюдались в [19], причем вторая волна инициировалась за счет взрывной эмиссии электронов на катоде.

Заключение

В данной работе показано, что при низких напряжениях (~ 25 kV) сверхкороткий лавинный электронный пучок в азоте и гелии генерируется на плоской части импульса напряжения при больших задержках относительно момента подачи напряжения на промежуток (до десятков наносекунд). Форма и длительность тока пучка убегающих электронов зависят от давления и сорта газа. При этом длительность тока пучка на полувысоте изменяется от 200 ps (генерация СЛЭП) до нескольких наносекунд. Во втором случае (при больших длительностях импульса тока пучка) механизм генерации пучка убегающих электронов изменяется. При повышенном давлении в газовом диоде напряжение на промежутке во время генерации СЛЭП уменьшается незначительно (на 10–20%). Запаздывание момента начала генерации электронного пучка относительно начала спада напряжения на промежутке обычно составляет менее 1 ns. Основным максимум на распределении электронов по энергиям в азоте при давлении 60 Torr и в гелии при давлении 300 Torr приходится на энергию электронов 10 и 12.5 keV соответственно. Отметим, что при энергии электронов ~ 16 keV и в гелии, и в азоте наблюдается второй максимум. Полученные данные подтверждают механизм генерации СЛЭП, предложенный в [4].

Список литературы

- [1] Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 564–568.
- [2] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 8. С. 1617–1620.
- [3] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Plasma Devices Oper. 2005. Vol. 13. N 4. P. 231–279.
- [4] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [5] Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. // Laser Part. Beams. 2005. Vol. 23. N 4. P. 545–551.
- [6] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 35–44.
- [7] Андреев Ю.А., Костыря И.Д., Кошелев В.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 105–111.
- [8] Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Петин В.К., Шляхтун С.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 12. С. 37–46.
- [9] Бакит Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 29–36.
- [10] Frankel S., Highland V., Sloan T., Van Dyck, and Wales W. // Nucl. Instr. Meth. 1966. Vol. 44. P. 345–348.
- [11] Станкевич Ю.Л., Калинин В.Г. // ДАН СССР. 1967. Т. 177. № 1. С. 72–73.

- [12] Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 4746–4748.
- [13] Кремнев В.В., Курбатов Ю.А. // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 4. С. 795–799.
- [14] Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1823–1831.
- [15] Сорокин А.П. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 10. С. 15–22.
- [16] Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
- [17] Бакит Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
- [18] Качев А.Н., Яковленко С.И. // Письма в ЖЭТФ. 2003. Т. 77. Вып. 5. С. 264–269.
- [19] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263–286.