

Генерация двойных импульсов тока пучка убегающих электронов при субнаносекундном пробое атомарных и молекулярных газов

© В.Ф. Тарасенко,^{1,2,3} Д.А. Сорокин,^{1,2} М.И. Ломаев^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru, SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 23 ноября 2015 г. В окончательной редакции 16 марта 2016 г.)

В гелии, водороде, неоне, азоте и воздухе при давлениях единицы–десятки Торр, амплитуде наносекундного импульса напряжения ≈ 250 кВ и установке после анодной фольги диафрагмы реализован режим генерации пучков убегающих электронов, состоящих из двух импульсов соизмеримой амплитуды, временной интервал между которыми составляет десятки–сотни пс. Показано, что пробой промежутка при давлениях единицы–десятки Торр имеет несколько различных режимов, а двойные импульсы тока пучка электронов регистрируются при начальном токе через промежуток до 1 кА. Установлено, что генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка, состоящего из одного импульса, происходит при задержке пробоя промежутка в сотни пикосекунд. Показано, что при давлениях различных газов сотни Торр, в том числе и при атмосферном давлении, убегающие электроны за анодной фольгой регистрируются после окончания импульса сверхкороткого лавинного электронного пучка.

Введение

Наносекундный пробой в неоднородном электрическом поле может быть использован для создания субнаносекундных ускорителей электронов с регулируемой за счет изменения давления в газовом диоде длительностью и формой импульсов тока пучка [1,2]. В работах [3–9] было показано, что импульс тока пучка убегающих электронов, формируемого в газовых диодах при подаче одного импульса напряжения, может состоять из двух компонентов с временным интервалом между амплитудными значениями сотни пс. Впервые два импульса тока пучка убегающих электронов были зарегистрированы в работе [3] при давлениях азота и гелия десятки–сотни Торр и напряжении генератора 25 кВ. Фронт импульса напряжения в этих экспериментах составлял ~ 5 нс, а ток пучка убегающих электронов генерировался на плоской части импульса напряжения. Было установлено, что имеется два различных режима работы газового диода с двумя импульсами тока пучка. В первом режиме, который наблюдался сравнительно редко, при давлении гелия 90 Торр за тонкой ($\sim 2 \mu\text{m}$) пленкой из кимфоли, покрытой слоем алюминия толщиной $\sim 0.2 \mu\text{m}$, были зарегистрированы два импульса сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) [10] с длительностью на полувысоте ~ 200 пс. Временной интервал (задержка) между максимумами этих импульсов составлял ~ 1.5 нс.

Во втором режиме [3,4,6], при котором генерация импульсов тока пучка также наблюдалась на плоской части

импульса напряжения, длительность первого импульса в широком диапазоне давлений была около ~ 200 пс. Этот импульс обычно соответствовал режиму генерации СЛЭП [10,11]. Длительность второго импульса составляла ~ 1 нс и зависела от давления газа. Задержка между максимумами этих двух импульсов также была ~ 1.5 нс. Измерения напряжения на промежутке показали, что пробой промежутка происходит в две стадии и спад напряжения при генерации первого импульса не превышает 30%. Во время второго импульса тока пучка напряжение на промежутке уменьшается до единиц киловольт, а амплитуда тока разряда приближается к величине тока короткого замыкания. При увеличении давления (в гелии до 300 Торр, в азоте до 60 Торр) второй импульс тока пучка при установке за сетчатым анодом кимфоли, покрытой слоем алюминия, исчезал и регистрировался только первый импульс СЛЭП. Однако, с сетчатым анодом из сетки второй импульс регистрировался, и его амплитуда могла превышать амплитуду первого импульса. Оценки энергии электронов в [6] по их ослаблению фильтрами показали, что в первом импульсе СЛЭП основная часть электронов имеет максимальную энергию ~ 10 кэВ при разряде в гелии и ~ 12.5 кэВ при разряде в азоте. Второй импульс состоял из электронов с энергией менее 3 кэВ, и поэтому он регистрировался только с сетчатым анодом. Мы связываем его формирование с движением от катода с малым радиусом кривизны к аноду второй волны ионизации, на фронте которой, как и при движении фронта первой волны ионизации, генерируются убегающие электроны.

При атмосферном давлении азота двойные импульсы тока пучка малой амплитуды были зарегистрированы с катодом, имеющим большую длину кромки с малым радиусом кривизны, при амплитуде импульса напряжения 160 кВ и длительности фронта 10 ns [5]. Первый импульс наблюдался на фронте импульса напряжения при малом токе через промежуток, а второй — на фронте импульса тока разряда в стадии завершеного пробоя промежутка.

Два импульса тока пучка во время одного импульса напряжения в азоте высокого давления были получены и при длительности фронта импульса напряжения ~ 0.5 ns и его амплитуде ~ 250 кВ [7]. Двойные импульсы регистрировались при уменьшении параметра E/p (E — напряженность электрического поля, p — давление газа) за счет повышения давления азота. Для регистрации второго импульса при давлении азота в несколько атмосфер необходимо было использовать сетчатый анод. В этих условиях во время первого импульса тока пучка напряжение на промежутке уменьшалось не более, чем на 30%, и его было достаточно для формирования второго импульса тока пучка во время повторного быстрого спада напряжения на промежутке. Амплитуда второго импульса тока пучка при выводе через сетку была больше, чем у первого импульса. Однако энергия электронов во втором импульсе была существенно ниже, чем в первом. Задержка между двумя максимумами двух импульсов тока пучка в этих условиях составляла ~ 150 ps.

Отметим, что в работе [7] также был зарегистрирован режим с двумя импульсами тока пучка субнаносекундной длительности в условиях высоких значений параметра E/p (> 10 кВ \cdot см $^{-1}$ \cdot Торр $^{-1}$), которые достигались за счет уменьшения давления в газовом диоде. При амплитуде импульса напряжения генератора ~ 250 кВ двойные импульсы СЛЭП с длительностью на полувысоте 100–170 ps регистрировались за AlMg-фольгой толщиной 50 μ m. Давление азота составляло 7–15 Торр. Амплитуда первого импульса тока пучка электронов была обычно больше, чем второго, а длительность на полувысоте меньше. Увеличение давления азота приводило к уменьшению амплитуды обоих импульсов, сокращению их длительностей, а также к уменьшению задержки между их максимумами. Задержка между импульсами с ростом давления уменьшалась от 470 до 340 ps. При давлении азота более 16 Торр регистрировался один импульс СЛЭП. Генерация двух импульсов тока пучка при высоких значениях параметра E/p в азоте наблюдалась только лишь при каждом третьем прикладываемом к промежутку импульсе напряжения. В остальных случаях за фольгой регистрировался только один импульс СЛЭП с амплитудой тока пучка примерно в два раза большей и длительностью на полувысоте ~ 100 ps. В ряде импульсов регистрировались меньшие задержки между максимумами (~ 200 ps), что привело к слиянию двух импульсов в один с плоской вершиной, который имел большую длительность на полувысоте, чем один импульс СЛЭП.

В гелии при высоких значениях параметра E/p , получаемых за счет уменьшения давления газа, была зарегистрирована следующая особенность временного поведения импульса тока пучка [1]. При давлениях 1–15 Торр на фронте импульса тока пучка наблюдался изгиб, исчезающий при более высоких давлениях. На части осциллограмм при увеличении давления гелия от 15 до 25 Торр наблюдалось двукратное уменьшение амплитуды тока пучка и его длительности. При этом часть импульса до перегиба на фронте осциллограммы тока сохранялась, а вторая половина импульса пропадала, и длительность спада импульса становилась короче, чем длительность переднего фронта. Это уменьшение длительности импульса тока пучка было объяснено более быстрым замыканием промежутка плотной плазмой разряда, которая распространяется от катода в виде волны ионизации. Кроме того, в ряде случаев регистрировались импульсы тока пучка малой длительности без характерного перегиба на переднем фронте, при этом амплитуда СЛЭП была наибольшей. Длительность импульса была примерно равна длительности импульса тока до перегиба на его фронте. Однако условия генерации таких импульсов тока пучка в работе [1] не исследовались.

В работе [9] двойные импульсы тока убегающих электронов в воздухе атмосферного давления были получены за счет экранировки катода с малым радиусом кривизны металлическим тором, имеющим большой радиус кривизны. Амплитуда падающей волны импульса напряжения составляла 250 кВ, а длительность фронта импульса ~ 400 ps. Задержка между амплитудными значениями импульсов в этом режиме, как и в работе [7], составляла ~ 150 ps. Энергия электронов во втором импульсе, как и в работах [3,4,7], была меньше, чем в первом пике.

Отметим, что кроме режимов генерации двух импульсов тока пучка во время одного импульса напряжения также известно о регистрации импульсов СЛЭП с двумя и более пиками [7,12–14]. Импульсы СЛЭП, имеющие два пика с задержкой между их амплитудами ~ 30 ps, были зарегистрированы при выводе тока пучка электронов через отверстия малого диаметра (~ 1 mm) в коллиматоре и пикосекундном разрешении системы регистрации. Двухпиковая форма импульса СЛЭП сохранялась при выводе пучка через Al-фольгу толщиной 100 μ m. При увеличении диаметра отверстия в коллиматоре длительность импульса СЛЭП увеличивалась, и отдельные пики на осциллограмме тока пучка становились неразличимыми.

Целью настоящей работы является исследование условий генерации при однократном импульсе напряжения двух импульсов СЛЭП в водороде, неоне, гелии, азоте и воздухе. Отметим, что данный режим отличается от режима генерации нескольких импульсов тока пучка в вакуумных диодах. Известно, что при подаче на вакуумный диод наносекундных импульсов напряжения от генераторов РАДАН-220 и СЛЭП-150 за счет появления отраженных импульсов напряжения отрицательной полярности могут генерироваться дополнительные импульсы тока пучка [1,15–17].

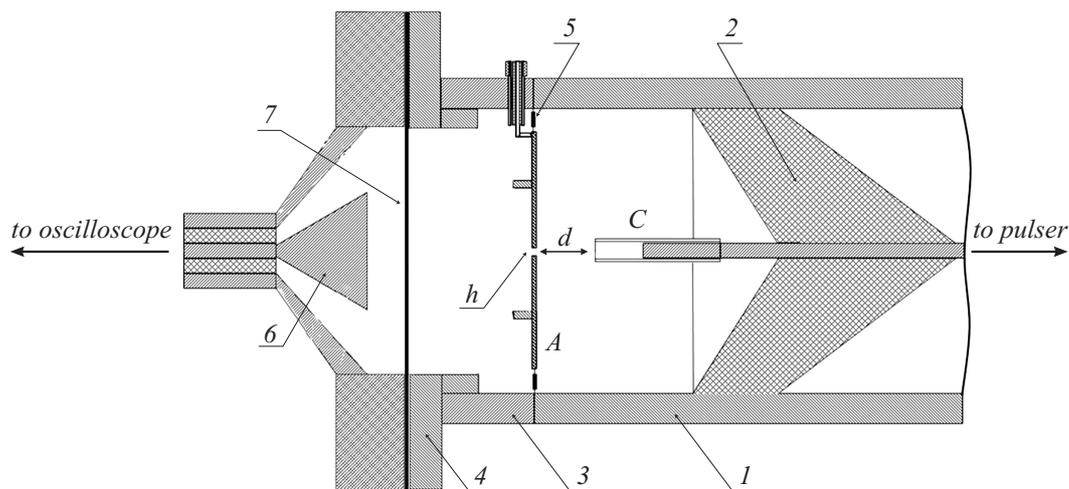


Рис. 1. Схематичное изображение разрядной камеры: 1 — металлический корпус разрядной камеры, 2 — изолятор, 3 — корпус токового шунта, 4 — фланец, 5 — тонкопленочные чип-резисторы, 6 — приемная часть коллектора. А — плоский заземленный анод (приемная часть токового шунта, либо металлическая фольга или сетка). С — высоковольтный катод, трубка из нержавеющей стали толщиной $100\ \mu\text{m}$ диаметром $6\ \text{mm}$. d — межэлектродное расстояние. h — отверстие в приемной части токового шунта диаметром $\sim 2\ \text{mm}$.

1. Экспериментальная установка и методики

Эксперименты были проведены на установке с генератором РАДАН-220 [18], к которому подключался газовый диод. Генератор РАДАН-220 формировал на разрядном промежутке в режиме холостого хода импульс напряжения с амплитудой $\sim 250\ \text{kV}$. Длительность импульса на полувысоте при согласованной нагрузке составляла $2\ \text{ns}$, а длительность фронта импульса напряжения $\sim 0.5\ \text{ns}$. В ряде экспериментов использовалась вторая сборка генератора РАДАН-220, при которой длительность фронта импульса напряжения была увеличена до $\sim 1\ \text{ns}$. Конструкция газового диода показана на рис. 1. Разрядный промежуток был образован плоским анодом и катодом с малым радиусом кривизны, что обеспечивало усиление электрического поля в прикатодной области. Катод был выполнен в виде трубки диаметром $\sim 6\ \text{mm}$ из фольги из нержавеющей стали толщиной $100\ \mu\text{m}$. В качестве анода использовались AlMg- и AlBe-фольги, которые армировались металлической сеткой или диском шунта с отверстием (h на рис. 1) в центре. Длина межэлектродного зазора d в данных экспериментах составляла $12\ \text{mm}$.

Амплитуда и форма импульса тока электронного пучка измерялись конусным коллектором с диаметрами приемной части 15 или $20\ \text{mm}$ и временным разрешением не хуже $80\ \text{ps}$ [14]. С целью уменьшения влияния электрического поля в диоде на регистрируемый коллектором сигнал перед ним устанавливалась дополнительная алюминиевая фольга толщиной $10\ \mu\text{m}$ (7). Откачка или заполнения коллектора газом могли производиться независимо через имеющееся в его корпусе отверстие. Ток через промежуток измерялся с помощью

шунта, изготовленного из пленочных чип-резисторов. Одновременная регистрация тока через промежуток и тока СЛЭП осуществлялась при использовании шунта с отверстием диаметром $2\ \text{mm}$ в центре (h на рис. 1), которое закрывалось AlMg-фольгой. Положение импульсов тока пучка относительно импульсов тока через промежуток и импульсов напряжения было определено с точностью не хуже $50\ \text{ps}$. В ряде экспериментов пучок электронов выводился через всю площадь AlBe-фольги толщиной $45\ \mu\text{m}$. В этом случае использовался коллектор с диаметром приемной части $20\ \text{mm}$, а ток через промежуток не регистрировался. При амплитуде тока пучка более $40\ \text{A}$ за фольгой устанавливались сетки с прозрачностью по свету 64 или 14% . Для регистрации импульса напряжения в ряде экспериментов применялся емкостной делитель. Электрические сигналы с датчиков подавались на осциллографы DPO 70604 ($6\ \text{GHz}$, $25\ \text{GS/s}$) или TDS 6604 ($6\ \text{GHz}$, $20\ \text{GS/s}$).

2. Экспериментальные результаты

2.1. Условия появления двух импульсов СЛЭП во время одного импульса напряжения

В настоящей работе основное внимание было уделено режиму, при котором регистрируются два импульса тока пучка убегающих электронов во время одного импульса напряжения с амплитудой более $100\ \text{kV}$, причем оба импульса тока пучка можно было отнести по их параметрам к пучкам, генерируемым в режиме СЛЭП. Соответственно оба импульса должны иметь субнаносекундную длительность и регистрироваться за анодной фольгой толщиной десятки микрон, что возможно при энергии электронов в десятки–сотни keV . Поэтому в

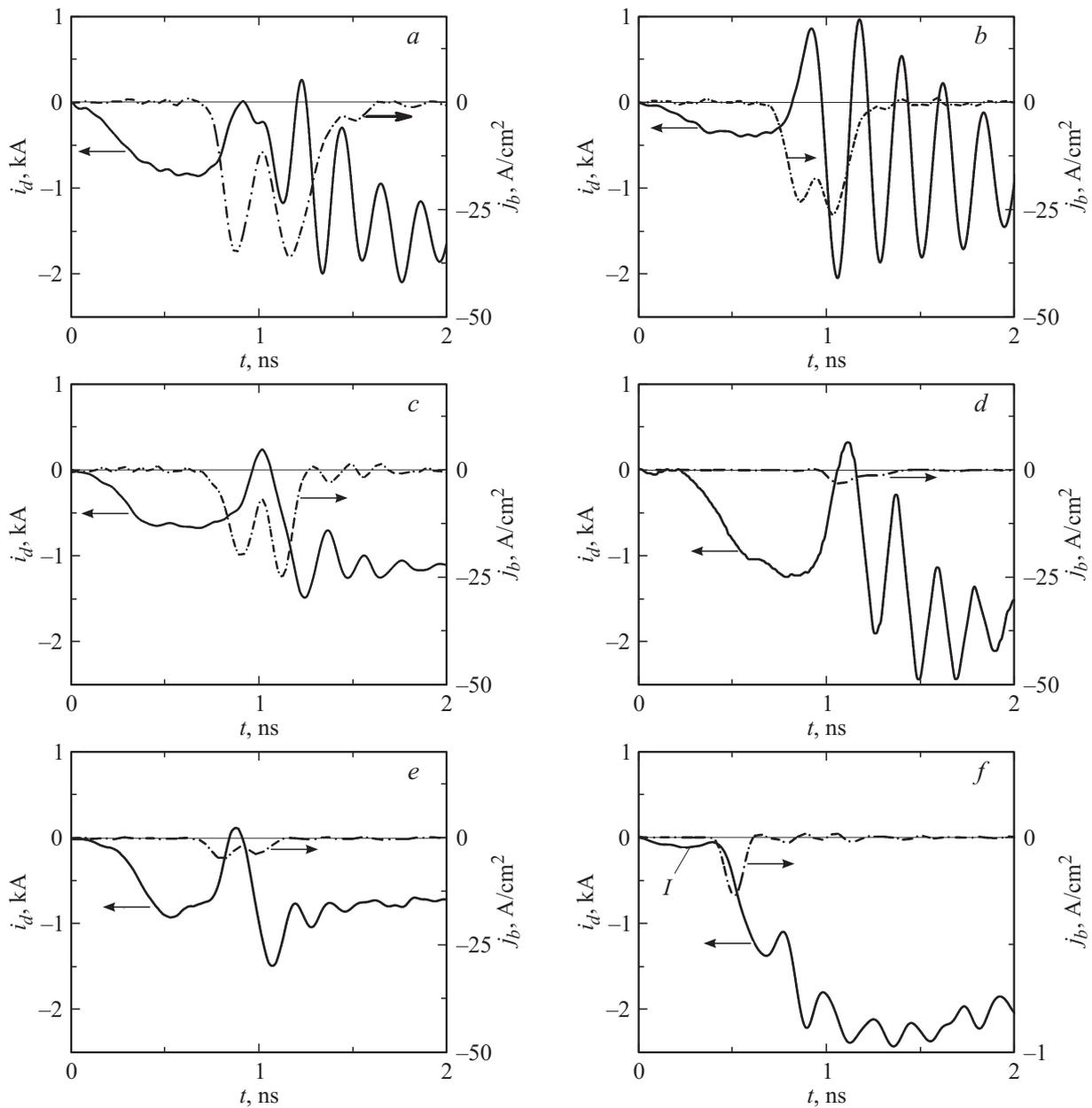


Рис. 2. Осциллограммы тока разряда i_d и тока пучка убегающих электронов j_b : *a* — гелий, 3 Torr; *b* — водород, 7 Torr; *c* — неон, 7 Torr; *d* — азот, 3 Torr; *e* — воздух, 5 Torr; *f* — воздух, 760 Torr. I — ток смещения.

основной части экспериментов пучок электронов регистрировался за AlMg-фольгой толщиной $50\ \mu\text{m}$ и измерения проводились при давлениях различных газов в единицы–десятки Torr. Область давлений для получения двойных импульсов СЛЭП была выбрана на основании результатов, полученных в работе [7].

Предварительные эксперименты показали, что режим формирования двух импульсов тока пучка легко зарегистрировать при установке за фольгой диафрагмы малого диаметра. В качестве диафрагмы использовалось отверстие в приемной части токового шунта (h рис. 1), которое располагалось на оси газового диода. При диафрагме 2 mm во всех пяти газах был зарегистрирован

режим генерации двух импульсов СЛЭП при одном импульсе напряжения. Осциллограммы двойных импульсов тока пучка с примерно равными амплитудами в гелии, водороде, неоне, азоте и воздухе, а также тока через промежуток приведены на рис. 2, *a–e*. Двойные импульсы СЛЭП в водороде, неоне и гелии при высоких значениях параметра E/p и одном импульсе напряжения в настоящей работе получены впервые.

Форма двойных импульсов тока пучка во всех газах могла быть подобной, как это показано на рис. 2, *a–e*. На рисунке специально приведены двойные импульсы СЛЭП с примерно равной амплитудой. Поскольку пучок убегающих электронов выходит со всей поверхности

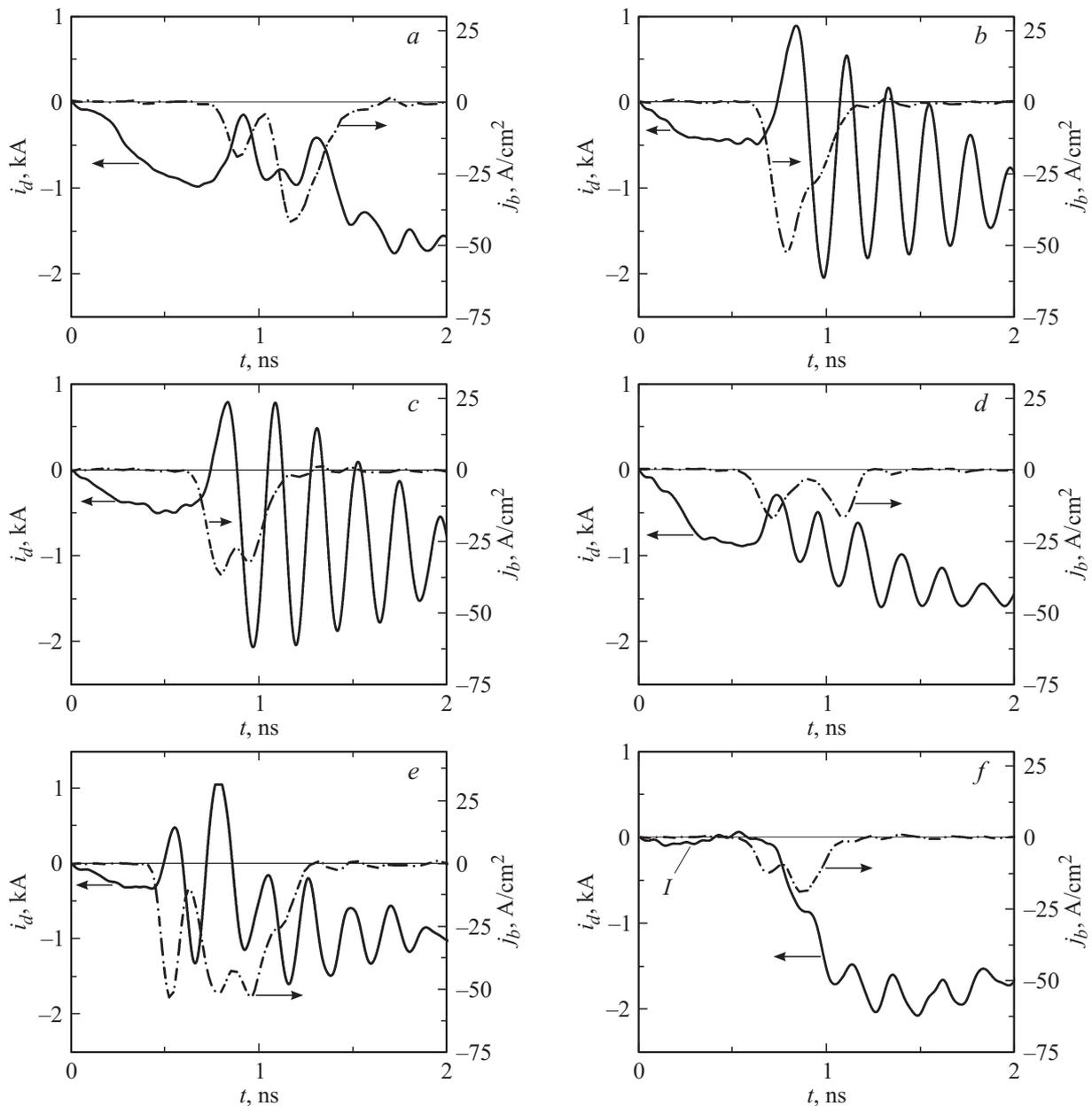


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда i_d и тока пучка убегающих электронов j_b . *a* — гелий, 3 Торг; *b, c, d, e* — водород, 7 Торг; *f* — водород, 30 Торг. I — ток смещения.

фольги плоского анода и часть электронов пучка попадает на боковую стенку газового диода [19], на рисунках приводятся значения плотности тока пучка за диафрагмой, расположенной на оси газового диода.

В результате измерений было установлено, что амплитуда и форма импульсов СЛЭП могут изменяться в процессе работы генератора, а число двойных импульсов зависит от сорта и давления используемого газа. Так, в серии из 20 импульсов при разряде в гелии при давлении 3 Торг двойные импульсы с примерно равной амплитудой регистрировались с вероятностью, близкой к 100%. В водороде при давлении 7 Торг в серии из 20 импульсов двойные импульсы с примерно равной ам-

плитудой регистрировались с вероятностью около 50%, а при увеличении давления до 15 Торг в серии из того же числа импульсов не было зарегистрировано ни одного двойного. В неоне при давлении 7 Торг вероятность появления двойных импульсов составила около 40%. В азоте и воздухе при тех же давлениях вероятность генерации двойных импульсов уменьшалась. Так, например, при давлении воздуха 5 Торг в серии из 15 импульсов был зарегистрирован только лишь один двойной импульс. Наибольшие плотности тока пучка за фольгой регистрировались в легких газах — гелии и водороде, а наименьшие — в воздухе и азоте. При атмосферном давлении всех газов в данных условиях регистрировался

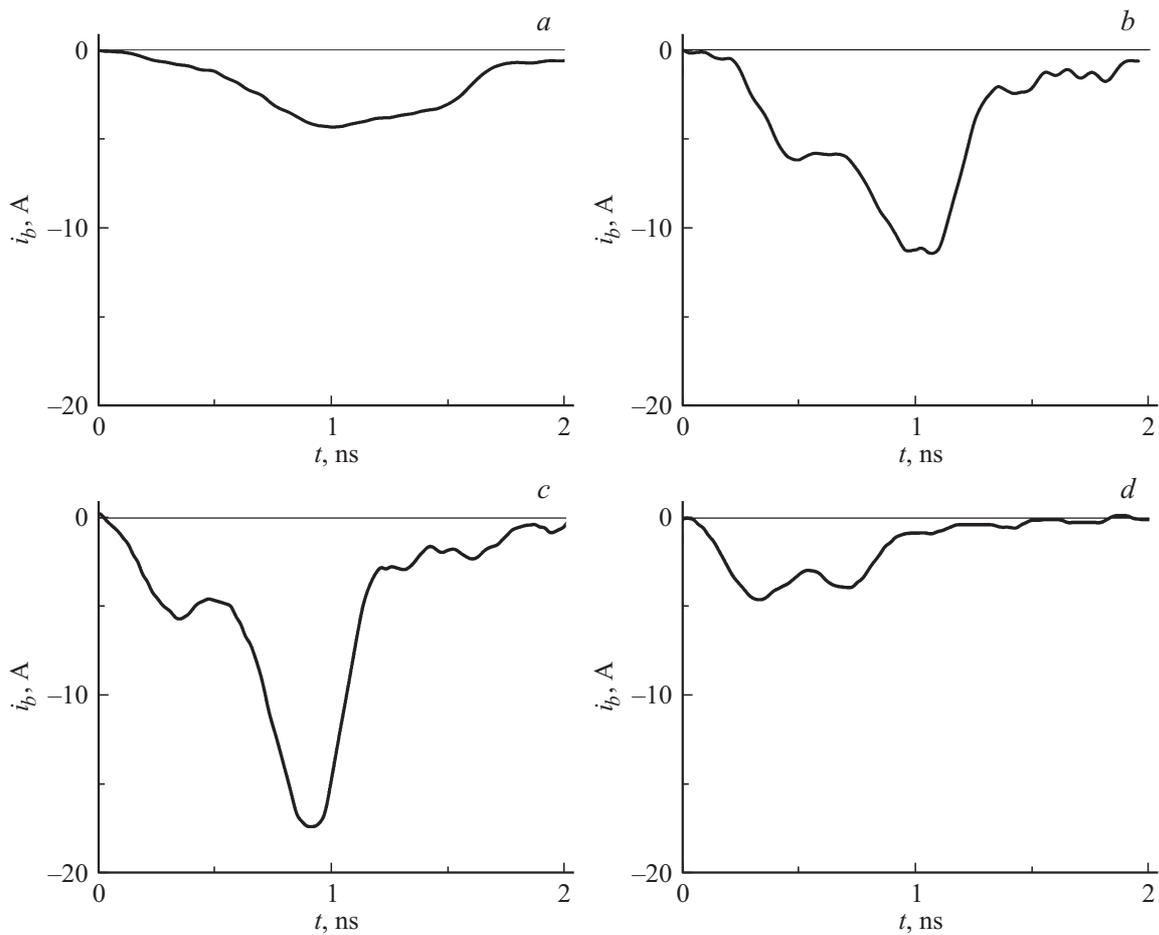


Рис. 4. Осциллограммы тока пучка убегających электронов i_b в гелии: *a* — AlBe-фольга ($45\ \mu\text{m}$) + сетка (14%) + сетка (64%), давление $\sim 8\ \text{Torr}$; *b* — AlBe-фольга ($45\ \mu\text{m}$) + Al-фольга ($120\ \mu\text{m}$) + сетка (14%), давление $\sim 8\ \text{Torr}$; *c* — AlBe-фольга ($45\ \mu\text{m}$) + Al-фольга ($220\ \mu\text{m}$), давление $\sim 8\ \text{Torr}$; *d* — AlBe-фольга ($45\ \mu\text{m}$) + Al-фольга ($220\ \mu\text{m}$), давление $\sim 15\ \text{Torr}$.

ярко выделенный первый импульс СЛЭП, а также уменьшалось число колебаний тока через промежуток. Типичный импульс СЛЭП при атмосферном давлении воздуха, а также импульс тока через промежуток показаны на рис. 2, *f*. Отметим, что при атмосферном давлении всех газов диффузная форма разряда при межэлектродном зазоре $12\ \text{mm}$ сохранялась и после генерации пучка электронов в течении единиц–десятков наносекунд.

На рис. 3 приведены осциллограммы тока пучка, иллюстрирующие изменение формы двойных импульсов. Видно, что задержка между первым и вторым импульсами может изменяться даже при одном давлении водорода (рис. 3, *b–d*). Данные импульсы были выбраны из серии, состоящей из 70 импульсов. С малой вероятностью ($< 5\%$) генерируются тройные импульсы тока пучка (рис. 3, *e*). При изменении давления могут изменяться соотношение между амплитудами первого и второго импульсов СЛЭП и их максимальная амплитуда (рис. 3, *f*). За диафрагмой $2\ \text{mm}$ также были зарегистрированы одиночные импульсы СЛЭП, время генерации которых соответствовало первому или второму импульсу СЛЭП при режиме генерации двух импульсов. Генерацию оди-

ночных импульсов СЛЭП в различные моменты времени можно объяснить неравномерным и отличающимся распределением плотности тока пучка по поверхности анода в первом и втором импульсах при неоптимальном давлении. В ряде случаев электроны первого импульса не попадают в диафрагму, а при других включениях генератора пучок второго импульса СЛЭП не попал в диафрагму. Это подтверждают эксперименты при регистрации пучка электронов без диафрагмы после анодной фольги. В этих условиях коллектором с диаметром приемной части $20\ \text{mm}$ обычно регистрировался один импульс с длительностью на полувысоте $\sim 500\ \text{ps}$, которая соответствовала длительности на полувысоте двух импульсов с одинаковой амплитудой. Отметим, что при уменьшении длительности фронта импульса напряжения до $300\ \text{ps}$ за фольгой без использования диафрагмы в подобных условиях регистрировался один импульс тока пучка с длительностью на полувысоте $\sim 300\ \text{ps}$ (см. рис. 1 в работе [20]).

На рис. 4, *a* приведена типичная осциллограмма импульса тока пучка в гелии при давлении $8\ \text{Torr}$, полученная за анодной фольгой без диафрагмы при длительно-

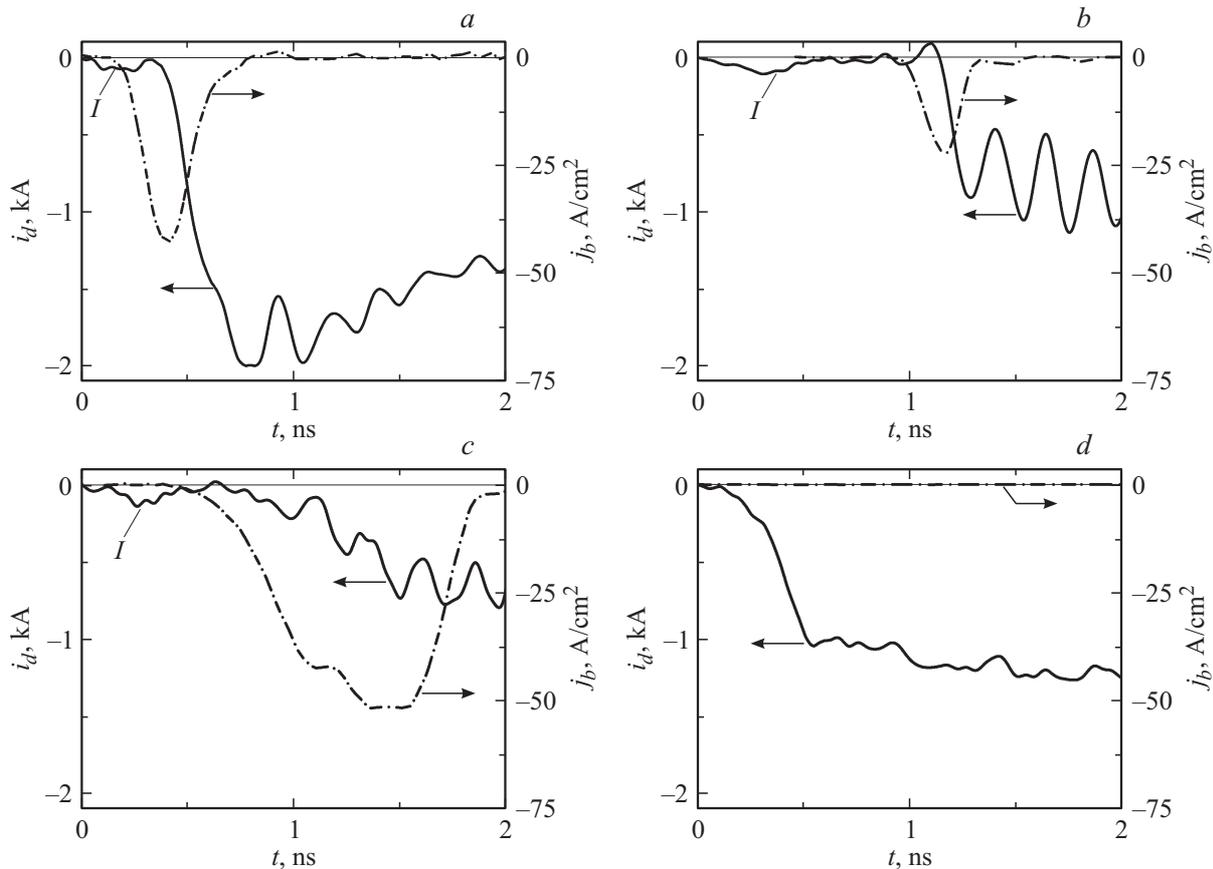


Рис. 5. Зависимость величины тока разряда i_d и плотности тока пучка убегающих электронов j_b от времени. *a* — неон, 7 Torr; *b* — воздух, 5 Torr; *c* — водород, 7 Torr; *d* — неон, 20 Torr. I — ток смещения.

сти фронта импульса напряжения ~ 1 ns. Пучок измерялся коллектором с диаметром приёмной части 20 mm. В этих условиях также регистрировался только один импульс, причем увеличение длительности фронта импульса напряжения до 1 ns привело к примерно двукратному увеличению длительности импульса тока пучка на полувысоте. На фронте импульса тока пучка, как и в работе [1], в большинстве импульсов регистрировался изгиб. Установка за анодом дополнительных экранов из Al-фольги привела к изменению формы импульсов тока пучка. На осциллограммах тока пучка стали видны два импульса с временным интервалом между их максимумами около 500 ps. Соотношения между амплитудами этих импульсов могло изменяться (рис. 4, *b-d*), как и в экспериментах с выводом пучка электронов через отверстие в диафрагме. Одианные импульсы тока пучка при давлениях гелия 7–15 Torr с длительностью на полувысоте ~ 200 ps также можно было зарегистрировать в сериях из 10–20 импульсов за AlBe-фольгой и при установке после фольги дополнительных экранов из Al, в том числе толщиной 220 μm .

На рис. 5 показаны режим генерации одного (первого) импульса СЛЭП в неоне (*a*) и воздухе (*b*); режим генерации, характерный для вакуумного диода (*c*); и режим быстрого пробоя промежутка, при котором элек-

тронный пучок не регистрировался (*d*). Осциллограммы на рис. 3 и 5 иллюстрируют тот факт, что при низких давлениях режимы генерации электронного пучка в зависимости от сорта и давления газа могут изменяться. Однако в определенных условиях (например, в гелии при давлении 3 Torr) режим генерации двух импульсов СЛЭП стабильно регистрируется при регистрации тока пучка за диафрагмой 2 mm.

Обсуждая данные на рис. 2, 3 и 5, мы анализировали в основном особенности осциллограмм тока пучка, регистрируемого коллектором за AlMg-фольгой толщиной 50 μm и диафрагмой диаметром 2 mm. Эти осциллограммы были получены вместе с осциллограммами тока через промежуток и синхронизованы с ними. Было установлено, что при генерации двойных импульсов вначале регистрируется ток через промежуток, амплитуда которого не превышала 1 kA. Кроме того, генерация двойных импульсов СЛЭП приводит к возникновению сильных колебаний на осциллограмме тока разряда. При генерации одианного импульса СЛЭП вначале проводимость промежутка обычно мала и соответствует току смещения „холодного“ диода. Под током смещения „холодного“ диода мы понимаем ток смещения через промежуток до появления в нем плотной плазмы, из которой вытесняется электрическое поле [21]. Далее

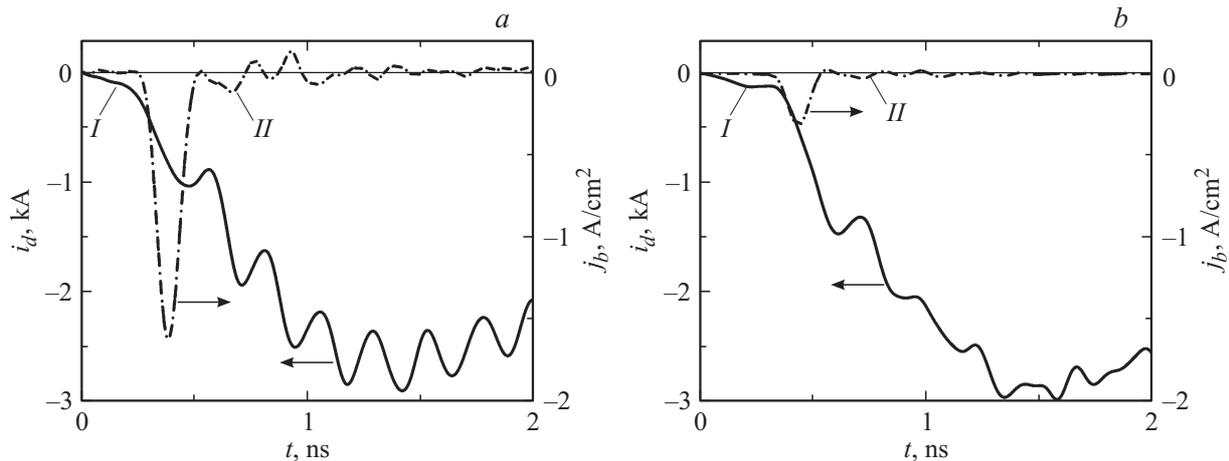


Рис. 6. Зависимость величины тока разряда i_d и плотности тока пучка убегающих электронов j_b от времени. *a* — водород, 760 Torr; *b* — азот, 760 Torr. *I* — ток смещения, *II* — ток пучка после первого импульса СЛЭП.

происходит нарастание тока пучка и тока через промежуток (рис. 5, *a, b*). Колебания на осциллограммах тока через промежуток при генерации одинарного импульса СЛЭП существенно меньше, чем при генерации двойных импульсов.

В неоне при давлениях 20 (рис. 5, *d*) и 40 Torr регистрировались осциллограммы тока разряда через промежуток, на которых колебания тока были малы, а пучок электронов не регистрировался. Ток через промежуток при этом начинает быстро нарастать, превышая ток смещения за время менее 100 ps. Данный режим разряда можно объяснить пробоем промежутка без формирования волны ионизации с высокой напряженностью электрического поля на ее фронте соответственно относительно равномерным распределением электрического поля по длине промежутка при росте проводимости. В этих условиях критическое поле для убегания электронов перед фронтом волны ионизации не достигается.

Амплитудное значение тока разряда через промежуток при атмосферном давлении всех газов и формировании диффузного разряда было больше, чем при давлении единицы—десятки Torr в условиях формирования двойных импульсов (рис. 2 и 6). Хотя, как известно [22], при диффузном разряде ток через промежуток уменьшается с ростом давления. Спад напряжения на промежутке при давлении азота 760 Torr в момент времени, соответствующий максимальному значению тока разряда через промежуток, не превышает 50%, а при давлении единицы—десятки Torr составляет не более 30%. Анализ осциллограмм тока через промежуток показывает, что напряжение на промежутке при низких давлениях всех пяти газов составляет около 200 kV и существенно уменьшается только после генерации второго импульса СЛЭП. Это определяет сравнительно высокую энергию электронов во втором импульсе тока пучка. Так, в гелии два импульса СЛЭП регистрировались за фильтром из алюминиевой фольги толщиной 200 μm , установленном после диафрагмы. При повышенных давлениях

(десятки—сотни Torr) импульс напряжения на промежутке имеет меньшую длительность на полувывоте и более быстрый спад. Второй импульс СЛЭП в этих условиях, как удалось установить, имел малую амплитуду.

2.2. Генерация убегающих электронов после окончания импульса СЛЭП при атмосферном давлении

При проведении исследований в настоящей работе было обнаружено, что убегающие электроны за AlMg-фольгой толщиной 50 μm при давлениях в сотни Torr, а также при атмосферном давлении регистрируются и после окончания импульса СЛЭП, причем для этого не нужно применять экранировку острой кромки катода [10]. На рис. 2, *f* и 6 приведены осциллограммы импульсов тока пучка и тока через промежуток при атмосферном давлении воздуха, водорода и азота. Видно, что убегающие электроны (обозначены цифрой *II* на рис. 6) регистрируются и после окончания импульса СЛЭП. Подобные осциллограммы были получены в гелии и неоне. Каждая из осциллограмм на рис. 6 является средней за 10–20 импульсов. Генерация убегающих электронов после окончания импульса СЛЭП также наблюдалась при давлениях ниже атмосферного для всех пяти газов. Для подтверждения достоверности данного результата было проведено более 10 серий опытов с регистрацией средних значений амплитуды тока пучка и тока через промежуток за 10–20 импульсов, а также зарегистрированы сотни импульсов в однократном режиме. В этих режимах после основного импульса СЛЭП напряжение на промежутке уменьшается, но его величина остается достаточно большой. Так, при заполнении газового диода азотом до давления 760 Torr напряжение на промежутке на 1-й наносекунде после прихода импульса напряжения составило около 200 kV [23].

При проведении данных экспериментов были подтверждены результаты, полученные в работе [7]. При уменьшении параметра E/p при давлениях азота и воздуха более 760 Torr наблюдается генерация двух импульсов тока пучка. Причем второй импульс СЛЭП регистрировался при замене фольги на сетку. В этих условиях энергия электронов во втором импульсе была существенно меньше, чем в первом, а длительность могла быть в несколько раз больше.

3. Обсуждение экспериментальных результатов

В результате проведенных исследований было установлено, что генерация двух импульсов СЛЭП наблюдается в условиях, когда до регистрации пучка электронов фиксируется ток разряда (≤ 1 kA), существенно превышающий ток смещения „холодного“ диода (~ 0.1 kA) (рис. 2). Ток смещения на рис. 2, 5 и 6 обозначен римской цифрой *I*. Однако ток разряда в три и более раз меньше, чем ток через промежуток в согласованном режиме (~ 3 kA), который реализуется после формирования диффузного разряда при давлении 760 Torr (рис. 6). Напряжение на промежутке через время 0.5–1 ns достигает максимального значения, а затем уменьшается. Как уже отмечалось, в данных условиях ($d = 12$ mm) в газовом диоде формировался диффузный разряд, время поддержания которого при всех давлениях превышало 2 ns. Уменьшение тока через промежуток при высоких значениях параметра E/p достигалось за счет понижения давления в газовом диоде (единицы–десятки Torr) и субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения [20]. Также было установлено, что режим генерации двух импульсов СЛЭП при однократном импульсе напряжения регистрируется при размещении за анодной фольгой диафрагмы с малым диаметром отверстия или при ослаблении тока пучка толстыми фольгами.

Генерацию двух импульсов тока пучка при низких давлениях можно объяснить неодновременной эмиссией электронов из различных катодных пятен или формированием с различной задержкой двух волн ионизации, распространяющихся от катода. Известно [24], что при уменьшении напряженности электрического поля в промежутке число катодных пятен уменьшается и увеличивается неоднородность эмиссии электронов с катода. Задержка появления отдельных катодных пятен при наносекундной длительности фронта импульса напряжения может составлять единицы наносекунд [24]. С уменьшением давления в газовом диоде также увеличиваются время формирования катодных пятен и неоднородность эмиссии электронов с различных участков катода. Соответственно плотная плазма у катодных пятен появляется в разное время. Это может приводить к неодновременному формированию волн ионизации с различных катодных пятен. В результате фронт каждой из волн

ионизации, которые имеют форму струй, начинающихся на катодных пятнах, достигает поверхности анода в разное время. Однако, неодновременным образованием катодных пятен при атмосферном давлении азота и воздуха можно объяснить только появление двухпиковых импульсов с задержкой между пиками около 30 ps [7,12–14]. Данное объяснение подтверждают эксперименты с катодами разной конструкции. Двухпиковая форма импульсов наблюдается при использовании катода в виде трубки из фольги диаметром 6 mm, на кромке которой формируется большое число катодных пятен. При использовании катода в виде конуса или шара малого диаметра, на которых обычно формируется одно катодное пятно, двухпиковая форма импульса СЛЭП не регистрируется.

Регистрацию двух и более импульсов тока пучка при малых давлениях различных газов в широком диапазоне экспериментальных условий за сравнительно тонкими анодными фольгами при установке диафрагмы с малым диаметром отверстия нельзя объяснить неодновременным образованием катодных пятен и меньшим перекрытием убегающих электронов от отдельных струй на коллекторе. Из полученных осциллограмм следует высокая стабильность амплитуд и задержек между двумя импульсами в оптимальных условиях. Сложно предположить, что примерно половина катодных пятен, например в гелии, возникает с фиксированной задержкой и определяет генерацию второго импульса СЛЭП. Мы предполагаем, что генерация первого импульса обусловлена формированием первой волны ионизации, при которой электроны эмитируются с катода за счет фотоэмиссии. Излучение УФ- и ВУФ-диапазонов спектра генерируется плазмой при частичном пробое поверхности изолятора в газовом диоде. УФ- и ВУФ-излучения, поглощаясь газом, инициируют ток в промежутке до формирования первой волны ионизации. При этом ток через промежуток не превышает 1 kA, и ток пучка за анодной фольгой не регистрируется. После формирования первой волны ионизации во время движения ее фронта к аноду генерируется первый импульс СЛЭП. Протекание через промежуток тока в сотни ампер приводит к образованию катодных пятен за счет взрывной эмиссии электронов и формированию второй волны ионизации. Во время движения ее фронта к аноду генерируется второй импульс СЛЭП. Большие изменения тока через промежуток, в том числе смена направления его протекания, при формировании двух импульсов волн СЛЭП связаны с остаточным положительным зарядом у анода после ухода быстрых электронов каждого из импульсов СЛЭП на анод. Это приводит к возникновению колебаний в газовом диоде и системе регистрации. Влияние электрического поля положительного заряда ионов у анода на ток через промежуток легко обнаружить при регистрации коллектором без установленной перед ним фольги (7) (рис. 1) и замене анодной фольги на сетку. Положительные выбросы тока, регистрируемого коллектором, имели место, в частности, при замене

анодной фольги на сетку и были зарегистрированы в работе [7]. Если волна ионизации не формируется, то СЛЭП не генерируется и на осциллограмме тока через промежутки колебания отсутствуют (рис. 4, *d*). Также колебания на осциллограмме тока через промежутки уменьшаются при генерации одного импульса СЛЭП (рис. 5, *a* и *b*). Для увеличения амплитуды тока через газовый диод при колебательном режиме необходимо, чтобы в промежутке формировались за короткое время две волны ионизации в одном направлении.

В наших работах [1–8, 11, 21], показано, что основное число уходящих электронов, регистрируемых за анодной фольгой, генерируется с фронта плотной плазмы при ее продвижении от катода к аноду и уходящие электроны распространяются в угол, превышающий 2π [19]. При регистрации тока пучка со значительной поверхности анода два импульса СЛЭП перекрываются, и уже сложно различить каждый из импульсов (рис. 4, *a*). Однако при увеличении толщины анодной фольги большая часть низкоэнергетических электронов в ней поглощается и становится видна двухкомпонентная структура импульса тока пучка (рис. 5, *b–d*). На основании проведенных экспериментов можно предположить, что электроны тока пучка с наибольшими энергиями генерируются в существенно меньший угол и это приводит к регистрации двух импульсов тока СЛЭП за толстыми фольгами.

Генерацию уходящих электронов после импульса СЛЭП при атмосферном давлении гелия, водорода, неона, воздуха и азота можно объяснить сравнительно высоким остаточным напряжением на промежутке после генерации СЛЭП вследствие формирования диффузного разряда [20, 23]. В настоящей работе, опираясь на результаты, полученные в [25] по исследованию пучка уходящих электронов и рентгеновского излучения, была увеличена чувствительность системы регистрации. Это позволило зарегистрировать уходящие электроны после генерации СЛЭП, на рис. 6 эти электроны обозначены римской цифрой II. Ток этих электронов существенно меньше амплитуды тока СЛЭП.

Заключение

В работе проведены экспериментальные исследования условий генерации пучков уходящих электронов, при которых в гелии, водороде, неоне, азоте и воздухе во время одного импульса напряжения регистрируются два импульса тока пучка субнаносекундной длительности. Показано, что до появления за анодной фольгой газового диода первого импульса СЛЭП через промежутки фиксируется ток с амплитудой до 1 кА, а после генерации тока пучка на сигнале с токового шунта возникают колебания. Установлено, что формирование двух импульсов тока пучка наиболее легко зарегистрировать при установке за фольгой диафрагмы. Предполагается, что генерация двух импульсов СЛЭП обусловлена формированием

двух волн ионизации, причем первая, по-видимому, формируется в условиях фотоэмиссии с катода, а вторая, после образования катодных пятен, за счет взрывной эмиссии электронов. При давлениях различных газов сотни Торг, в том числе при атмосферном, уходящие электроны зарегистрированы после первого импульса СЛЭП. Двухпиковая форма импульсов тока СЛЭП, которые были зарегистрированы в работах [7, 12–14], объясняется одновременным образованием катодных пятен на различных участках протяженной кромки катода и одновременным приходом волн ионизации, которые стартуют с этих катодных пятен.

Авторы благодарят А.Г. Бураченко и Д.В. Рыбку за помощь при проведении экспериментальных исследований.

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

Список литературы

- [1] Бакут Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 12. С. 29–34.
- [2] Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Sorokin D.A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38. N 10. P. 2583–2587.
- [3] Бакут Е.Х., Тарасенко В.Ф., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 29–36.
- [4] Baksh E.Kh., Tarasenko V.F., Lomaev M.I., Rybka D.V., Tkachev A.N., Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2007. Vol. 17. N 9. P. 1124–1128.
- [5] Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 43–49.
- [6] Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 98–103.
- [7] Тарасенко В.Ф., Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Рыбка Д.В. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 11. С. 1001–1008.
- [8] Бакут Е.Х., Беломытцев С.Я., Бураченко А.Г., Рыжов В.В., Тарасенко В.Ф., Шкляев В.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 5. С. 144–149.
- [9] Mesyats G.A., Sadykova A.G., Shunailov S.A., Shpak V.G., Yalandin M.I. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41. N 41. P. 2863–2870.
- [10] Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94–95.
- [11] Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 73–78.
- [12] Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Балзовский Е.В. // в ЖТФ. 2012. Т. 38. Вып. 14. С. 32–40.
- [13] Tarasenko V.F., Rybka D.V., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Balzovsky E.V. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 086 106.
- [14] Балзовский Е.В., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2015. № 5. С. 62–67.
- [15] Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Фомин Е.А., Шпак В.Г. // ПТЭ. 1987. № 4. С. 175–177.
- [16] Нагорный Д.Ю., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // ПТЭ. 1990. № 3. С. 169–172.
- [17] Алексеев С.Б., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2013. № 5. С. 85–89.

- [18] Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [19] Tarasenko V.F., Vaksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. // Plasma Devices and Operation. 2008. Vol. 16. No 4. P. 267–298.
- [20] Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Бакирт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Ткачев А.Н. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 3. С. 61–65.
- [21] Тарасенко В.Ф., Белоплотов Д.В., Ломаев М.И. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 10. С. 902–917.
- [22] Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Федоров А.И. Квант. электрон. 1973. № 3 (15). С. 103–105.
- [23] Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I., Sorokin D.A. // International J. Advanced Research in Physical Science. 2014. Vol. 1. N 6. P. 27–34.
- [24] Пегель И.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 31–48.
- [25] Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. № 3. С. 294–299.