

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
ПЛАЗМА

УДК 537.5

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ СТРУКТУРА ИМПУЛЬСА ТОКА ПУЧКА
УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ГЕНЕРИРУЕМОГО
ПРИ ПРОБОЕ АЗОТА ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2012 г. В. Ф. Тарасенко, М. В. Ерофеев, М. И. Ломаев, Д. А. Сорокин, Д. В. Рыбка

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

e-mail: yft@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 26.01.2012 г.

Окончательный вариант получен 21.03.2012 г.

Исследованы условия формирования пучков убегающих электронов в азоте повышенного давления, при которых во время одного импульса напряжения регистрируются два импульса тока электронного пучка. Показано, что для реализации режима с двумя импульсами тока пучка необходимо уменьшать напряженность электрического поля E в промежутке или значение параметра E/p (p — давление газа). Установлено, что режим с двумя импульсами тока пучка наблюдается как при высоких давлениях (1500–3000 Торр), так и при низких (менее 100 Торр). Показано, что при формировании второго импульса тока пучка первый импульс тока пучка должен приводить к частичному снижению напряжения на промежутке. При низком давлении азота (~10 Торр) режим генерации двух импульсов тока электронного пучка может реализоваться, за счет увеличения электрической прочности промежутка, и при высоких значениях E/p . В воздухе атмосферного давления зарегистрирована, при пикосекундном временном разрешении и фронте импульса напряжения ~300 пс, сложная форма импульса тока пучка электронов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Убегающие электроны, генерируемые при подаче наносекундных импульсов высокого напряжения на промежуток, оказывают существенное влияние на пробой различных газов повышенного давления, особенно в неоднородном электрическом поле [1–4]. Также известно, что пробой в длинных трубках из диэлектрика происходит за счет формирования волн ионизации, которые распространяются от высоковольтного электрода [5, 6]. В последние годы значительно возрос интерес к изучению условий генерации пучков убегающих электронов, регистрируемых за фольгой газового диода (например, статьи [7–14] и ссылки в них). Ранее в ряде работ [15–18] сообщалось о регистрации пучков убегающих электронов, которые при подаче на промежуток одного импульса напряжения состояли из двух импульсов. Также известно о регистрации двух импульсов рентгеновского излучения в результате подачи на промежуток одного импульса напряжения [19].

Два импульса тока пучка убегающих электронов при подаче на промежуток одного импульса напряжения были, по-видимому, впервые зарегистрированы в работе [15]. Такой режим наблюдался при давлениях азота и гелия десятки-сотни Торр и напряжении генератора 25 кВ. Генерация импульсов тока пучка происходила на плоской части импульса напряжения с длительностью фронта ~5 нс. Было установлено, что имеется два

различных режима работы газового диода с генерацией двойных импульсов. В первом режиме, который наблюдался сравнительно редко, при давлении гелия 90 Торр за тонкой пленкой из кимфоли толщиной ~2 мкм, покрытой слоем алюминия толщиной ~0.2 мкм, были зарегистрированы два импульса тока пучка с длительностью на полувысоте ~200 пс. Задержка между их максимумами составила ~1.5 нс. После первого импульса тока пучка на осциллограмме тока регистрировалось плато, длительность которого, по основанию, достигала ~2.5 нс.

Во втором режиме [15, 16, 18], при котором генерация импульсов тока пучка также наблюдалась на плоской части импульса напряжения, длительность первого импульса в широком диапазоне давлений была ~200 пс. Этот импульс обычно соответствовал режиму генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.) [4]. Длительность второго импульса составляла ~1 нс и зависела от давления газа. Задержка между максимумами этих двух импульсов также составляла ~1.5 нс. Измерения напряжения на промежутке показали, что при генерации первого импульса спад напряжения обычно не превышает 30%. Во время генерации 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 им-

пульс тока пучка исчезал и регистрировался только первый импульс (с.л.э.п.). Однако при замене фольги сеткой второй импульс появлялся вновь, а его амплитуда могла превышать амплитуду первого импульса. Полученное распределение электронов по энергиям [18] показало, что в первом импульсе максимум на распределении электронов по энергиям при разряде в гелии соответствовал энергии ~ 10 кэВ, а при разряде в азоте ~ 12.5 кэВ. Второй импульс состоял из электронов с энергией менее 3 кэВ и поэтому не регистрировался за покрытой алюминием пленкой.

При атмосферном давлении азота двойные импульсы тока пучка были зарегистрированы при импульсе напряжения амплитудой 160 кВ и длительностью фронта 10 нс [17]. Первый импульс наблюдался на фронте импульса напряжения, а второй в стадии заверщенного пробоя промежутка на фронте импульса тока разряда.

В воздухе атмосферного давления двухкомпонентные импульсы тока пучка убегающих электронов были зарегистрированы в работе [13]. Амплитуда импульса напряжения составляла 300–380 кВ, а фронт импульса ~ 0.5 нс. Задержка между максимумами тока пучка в этом режиме составляла ~ 150 пс. Энергия электронов во втором импульсе тока пучка, как и в работе [18], при описанном выше втором режиме, была меньше, чем в первом импульсе. В ряде импульсов тока пучка, приведенных в работе [13], явно выраженных двухкомпонентных импульсов не наблюдалось, а регистрировался затянутый спад импульса тока пучка. Отметим также работу [20], в которой при выводе тока пучка через отверстие диаметром 1 мм были зарегистрированы импульсы электронов пучка с энергией не более 7 кэВ, длительность которых на полувисоте составляла ~ 210 пс. Амплитуда импульса напряжения генератора в [20] составляла ~ 220 кВ, а длительность фронта импульса ~ 0.5 нс.

Целью настоящей работы является изучение условий, при которых во время одного импульса напряжения генерируется пучок убегающих электронов, регистрирующийся в виде двух отстоящих по времени или двухкомпонентных импульсов, а также исследование структуры импульса тока пучка с временным разрешением до ~ 25 пс.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ

Эксперименты были проведены на трех установках с использованием газовых диодов, которые подключались к трем наносекундным генераторам. Это позволило изменять амплитуду и фронт импульса напряжения. В установке № 1 был задействован генератор СЛЭП-150, который подробно описан в [4, 9, 14]. Генератор формировал импульсы напряжения с амплитудой падаю-

щей волны в передающей линии ~ 140 кВ и ~ 280 кВ в отсутствие пробоя промежутка. Длительность фронта импульса напряжения τ_f , величина которой составляла ~ 300 пс, определялась обострителем разрядником Р-43 и конструкцией газового диода. В установке № 2 использовался импульсный генератор РАДАН-220 [21], который формировал на разрядном промежутке в режиме холостого хода импульсы напряжения с амплитудой ~ 220 кВ и длительностью на полувисоте на согласованной нагрузке ~ 2 нс при длительности фронта $\tau_f \sim 0.5$ нс. Газовый диод, используемый в установке № 3, показан на рис. 1. В этой установке от импульсного трансформатора заряжался отрезок кабеля длиной 5 м с волновым сопротивлением 50 Ом, который был соединен с обострителем разрядником. Импульс напряжения, после срабатывания обострителем разрядника, подавался на катод (4) газового диода (см. рис. 1). Амплитуда импульса напряжения могла изменяться от 15 до 25 кВ. Длительность фронта импульса τ_f не превышала 2 нс.

Конструкция газового диода на всех трех установках была подобной (см. рис. 1 и работы [3, 4, 9, 14]). 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 6 мм из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм. В качестве анодов использовались тонкие фольги из алюминия и сплава AlMg (марка АМг2-Н, толщина 50 мкм; процентное содержание Al: 95.7–98.2%; Mg: 1.7–2.4%; Fe: до 0.5%; Si: до 0.4%; Mn: 0.1–0.5%; Cr: до 0.05%; Ti: до 0.15%; Cu: до 0.15%; Zn: до 0.15%). Также использовалась пленка из кимфоли ($C_{16}H_{14}O_3$) толщиной ~ 2 мкм, покрытая слоем алюминия толщиной ~ 0.2 мкм, которая армировалась металлической сеткой с прозрачностью 64% и толщиной проволочек ~ 30 мкм. Длина межэлектродного зазора могла изменяться от 4 до 18 мм. Большинство экспериментов было выполнено при расстоянии между электродами $d = 12$ мм.

Импульс напряжения регистрировался с помощью емкостного делителя напряжения, установленного на конце передающей линии генератора. Измерения тока разряда осуществлялись при использовании шунта на чип-резисторах с сопротивлением ~ 0.04 Ом. Амплитуда и форма импульса тока электронного пучка измерялись с помощью коллекторов с диаметрами приемной части 15 и 20 мм и временным разрешением не хуже 100 пс [14]. Для измерения электрических сигналов использовались осциллографы DPO 70604 (6 ГГц и 25 выборок в нс), TDS-6604 (6 ГГц, 20 выборок в нс) на установках № 1 ($U_{max} \sim 280$ кВ, $\tau_f \sim 300$ пс) и № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) и

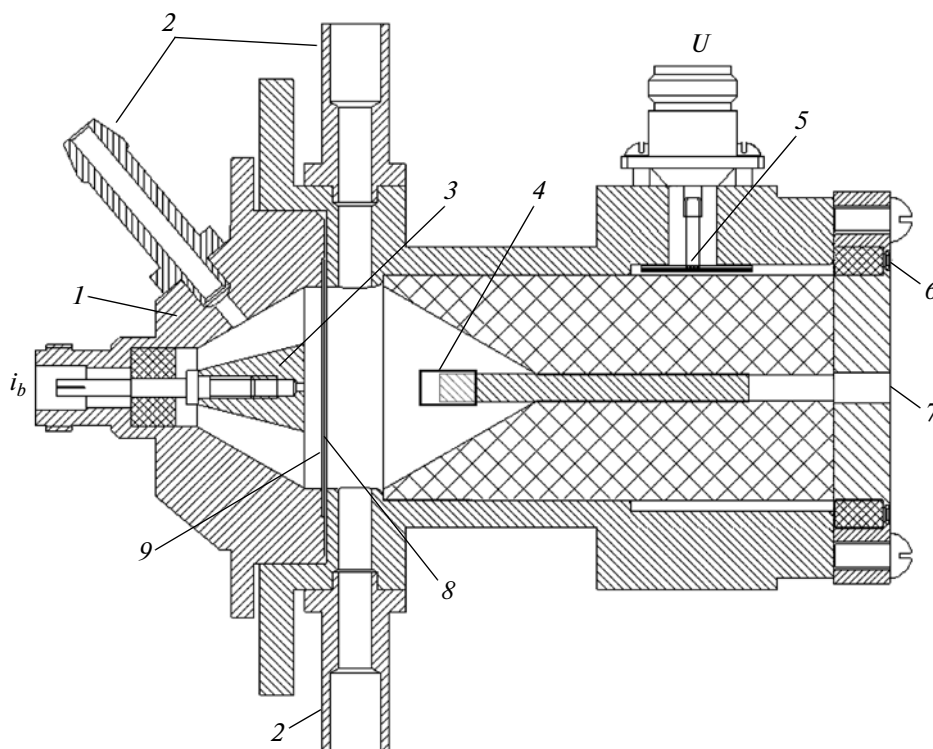


Рис. 1. Сборочный чертеж разрядной камеры. 1 – корпус коллектора, 2 – патрубки для напуска и откачка газа, 3 – приемная часть коллектора, 4 – трубчатый катод, 5 – емкостной делитель напряжения, 6 – шунт, 7 – отверстие для подключения высоковольтного кабеля, 8 – анод из фольги или сетки.

TDS–3054В (0.5 ГГц, 5 выборок за 1 нс) на установке № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс), а также широкополосные ослабители и кабели.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Влияние амплитуды импульса напряжения и давления на режим генерации тока пучка

Как показали проведенные исследования, генерацию двух импульсов тока пучка при высоковольтном наносекундном разряде наиболее просто регистрировать при амплитуде импульса напряжения в десятки киловольт и сравнительно низких значениях параметра E/p (E – напряженность электрического поля, p – давление газа). На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на промежутке, тока разряда и тока пучка, полученные на установке № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс) при давлении азота 30 Торр. Электронный пучок выводился через алюминизированную кимфоль. При малых напряжениях на промежутке и давлении азота 30 Торр, пучок электронов за пленкой не регистрируется и скорость роста тока разряда через промежуток мала, рис. 2а. При увеличении амплитуды напряжения до ~ 20 кВ за пленкой регистрируется двухкомпонентный импульс тока пучка, рис. 2б. Данные осциллограммы подобны тем, которые были получены в работах [15,

18] при напряжении генератора 25 кВ. Отличие заключается в том, что на установке №3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс) длительность фронта импульса при напряжениях более 20 кВ не превышала 1.5 нс. В этих условиях спад импульса напряжения и нарастание тока разряда не были разделены на две стадии. Кроме того, уменьшилась нестабильность пробоя промежутка. Амплитуда первой компоненты импульса тока пучка превышала амплитуду второй, что можно связать с уменьшением энергии электронов пучка, соответствующего второй компоненте, как и в работе [18]. Задержка между максимумами первой и второй составляющих импульса тока пучка на установке № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс) была того же порядка, что и в работах [15, 18], и составляла ~ 1.5 нс. Дальнейшее увеличение амплитуды импульса напряжения приводило к увеличению скорости спада напряжения на промежутке и скорости роста тока разряда. Амплитуда тока электронного пучка при этом существенно увеличивались, рис. 2в, и в большинстве импульсов регистрировалась только первая компонента импульса тока пучка. Для получения двухкомпонентного импульса тока пучка электронов при повышенных напряжениях необходимо было увеличивать давление азота в газовом диоде. При замене анодной фольги на сетку, генерацию пучка убегающих

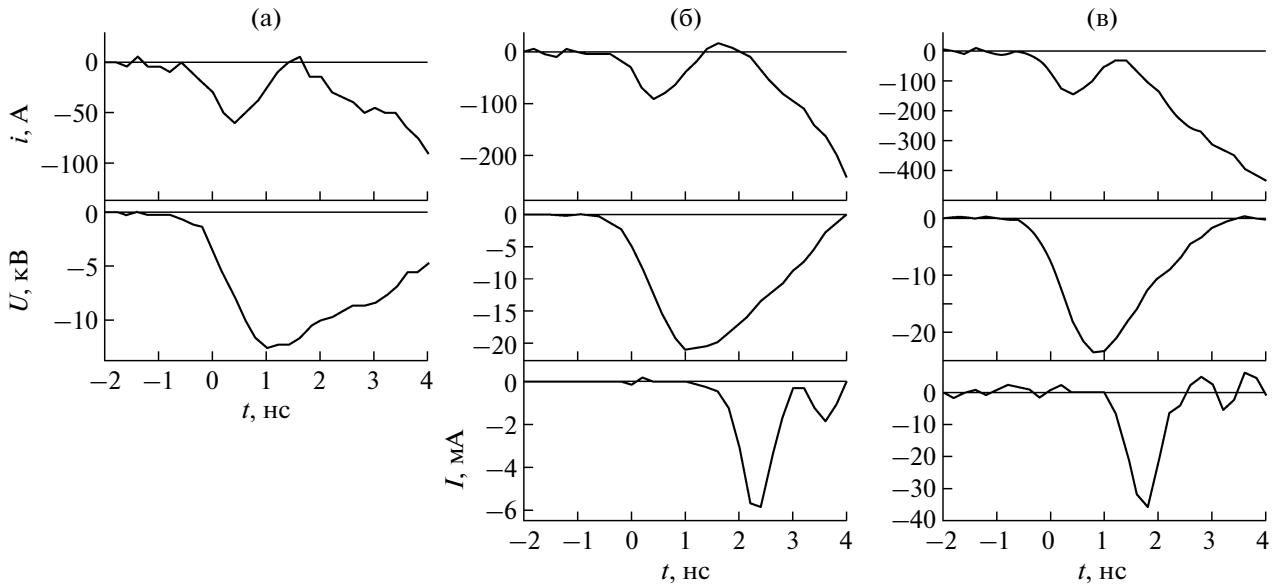


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока разряда i , напряжения на промежутке U и тока пучка электронов I за анодом из металлической сетки с прозрачностью 64%, покрытой металлизированной (слой алюминия толщиной 0.2 мкм) пленкой из кимфолы толщиной 2 мкм. Межэлектродное расстояние $d = 12$ мм, давление азота $p = 30$ Торр.

электронов, импульс тока которого состоит из двух, можно было наблюдать в более широком диапазоне давлений и напряжений. Это связано с возможностью регистрации электронов пучка с энергией в единицы кэВ.

Зависимость задержки между максимумами амплитуд первой и второй компоненты импульса тока пучка от длины межэлектродного зазора d показана на рис. 3. Эта задержка обычно увеличивалась с уменьшением напряженности электрического поля и E/p на рис. 3 за счет увеличения межэлектродного зазора.

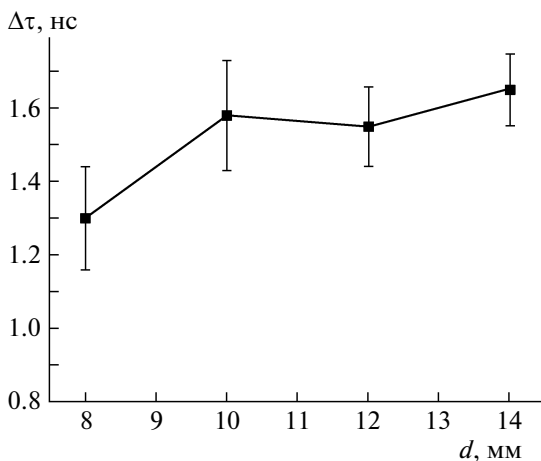


Рис. 3. Зависимость времени задержки между максимумами первого и второго импульса тока пучка электронов за кимфолью от величины межэлектродного расстояния d .

При увеличении амплитуды импульса напряжения генератора до ~ 220 кВ и сокращения длительности его фронта до ~ 0.5 нс, на установке № 2 наряду с однокомпонентными импульсами также были получены двухкомпонентные импульсы тока пучка электронов. На рис. 4а,б показаны импульсы тока пучка, которые были зарегистрированы за AlMg фольгой толщиной 50 мкм (осциллограммы 1). Однокомпонентные импульсы за фольгой регистрировались при изменении давления в газовом диоде от 30 до 3000 Торр. При замене анодной фольги на сетку при давлениях 30–1000 Торр также регистрировался однокомпонентный импульс тока пучка (осциллограмма 2 на рис. 4а). Данный режим был подобен режиму, который наблюдался на установке № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс) при повышенных напряжениях. Отметим, что и в воздухе атмосферного давления на установке № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) также регистрировался только один импульс тока пучка.

Генерация двухкомпонентного импульса тока пучка на установке № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) была получена при уменьшении параметра E/p за счет повышения давления азота в промежутке. Как и на установке № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс), два импульса тока пучка регистрировались при подаче на промежуток одного импульса напряжения. Для регистрации второй составляющей импульса было необходимо использовать сетчатый анод. Второй импульс тока пучка, который отмечен как III, появлялся при увеличении давления азота выше 1500 Торр, осциллограмма 2 на рис. 4б. Участок I на осциллограммах 2 (рис. 4) соответствует

емкостному току, участок II первому импульсу тока пучка и участок IV положительному выбросу тока с коллектора. Положительный выброс IV на осциллограмме тока с коллектора и дальнейшие колебания тока обусловлены реакцией осциллографа на короткий сигнал и влиянием заряда положительных ионов, которые остались в промежутке после ухода быстрых электронов на коллектор. На рис. 4 также приведены осциллограммы тока разряда 3, снятые с помощью шунта на чип-резисторах [4]. Привязка импульса тока пучка к току разряда осуществлялась по емкостному току, который регистрировался вместе с током пучка за сетчатым анодом (см., например, [9]). При давлениях 30–1000 Торр синхронно с генерацией первой составляющей тока электронного пучка происходит существенный спад напряжения на промежутке. Об этом свидетельствует возрастание тока разряда до 2 кА во время достижения максимальной амплитуды тока пучка, рис. 4а. В этих условиях при амплитуде импульса напряжения генератора ~220 кВ, как и на установке № 1 ($U_{max} \sim 280$ кВ, $\tau_f \sim 300$ пс), формируется однокомпонентный импульс тока электронного пучка.

При увеличении давления, в момент времени, соответствующий первой компоненте импульса тока пучка, напряжение на промежутке уменьшается не столь существенно, что следует из величины тока разряда, рис. 4б. Значение величины тока разряда не превышало 400 А. При этих условиях на промежутке сохраняется напряжение, достаточное для формирования пучка электронов, которому соответствует вторая компонента на регистрируемом импульсе тока пучка. Ее амплитуда при выводе пучка через сетку обычно была больше, чем у первой. Однако энергия электронов соответствующая второй составляющей импульса была существенно меньше, чем для первой, соответственно, вторая компонента в данных экспериментах регистрировалась только при выводе пучка через сетку, рис. 4б (осциллограмма 2). Задержка между двумя максимумами двух этих компонент импульса тока пучка составляла ~150 пс, что соответствует задержке, которая была зарегистрирована в работе [13].

3.2. Генерация двух импульсов тока пучка при малых давлениях и высоких напряжениях

На установке № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс), по-видимому, впервые был обнаружен режим, при котором регистрируются двухкомпонентные импульсы тока пучка убегающих электронов при высоких значениях параметра E/p . При амплитуде импульса напряжения генератора ~220 кВ двойные импульсы тока пучка регистрировались при малых давлениях азота (7–15 Торр). Амплитуда первой компоненты импульса тока была боль-

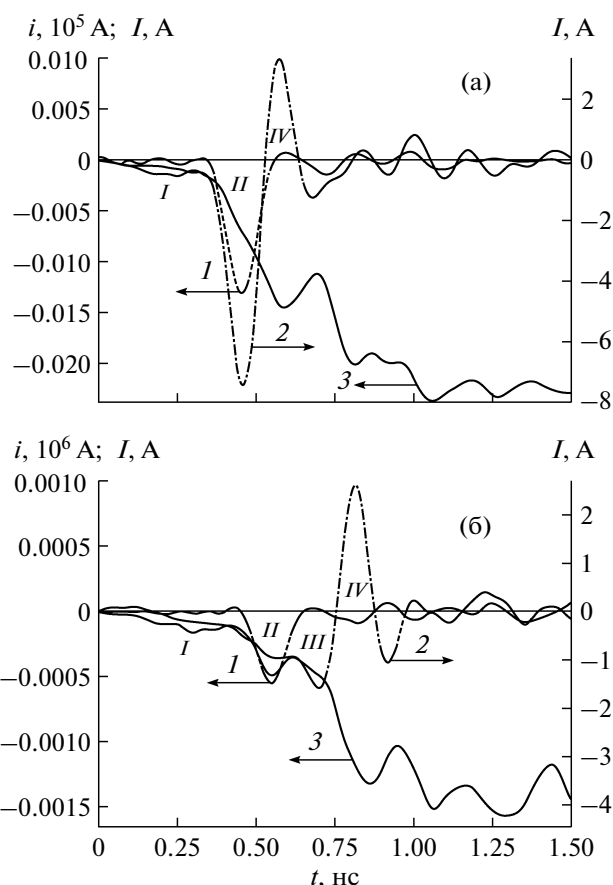


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока пучка убегающих электронов I (осциллограммы 1, 2) и тока разряда i (осциллограммы 3) при $d = 12$ мм: а) – давление азота 760 Торр., анод из AlMg фольги толщиной 50 мкм армированный сеткой с прозрачностью по свету 64%; б) – давление азота 2700 Торр., анод сетка с прозрачностью по свету 64%.

ше, чем второй, а длительность на полувисоте меньше, рис. 5а,б. На рис. 6 приведены зависимости длительностей обеих составляющих импульса на полувисоте, а также задержки между максимумами первой и второй от давления. Увеличение давления азота приводило к уменьшению амплитуды обеих компонент, сокращению их длительности и задержке между их максимумами. При давлении азота более 16 Торр две составляющие импульса сливались в одну, рис. 5б. Отметим, что генерация двухкомпонентных импульсов тока пучка при высоких значениях параметра E/p наблюдалась не при каждом импульсе напряжения, а с вероятностью около 30%. В остальных импульсах за фольгой регистрировался только одиночный импульс тока пучка с амплитудой примерно в два раза большей, рис. 5б. Также в ряде случаев наблюдались импульсы, состоящие из двух компонент, которые имели меньшую задержку между максимумами, что привело к их слиянию. На рис. 5в приведены осциллограмма тока

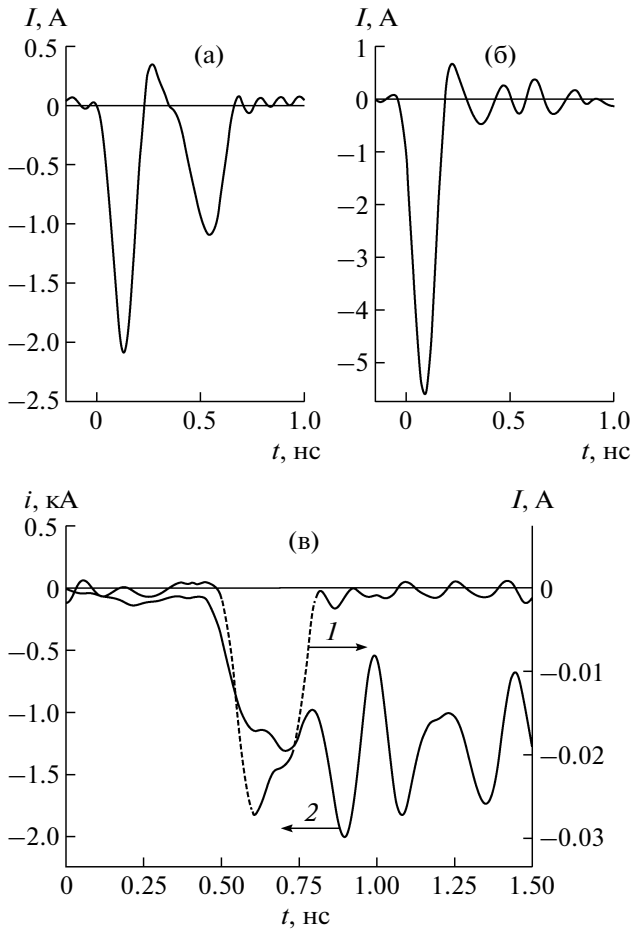


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока электронного пучка при давлениях азота 10 (а) и 21 Торр (б) при $d = 12$ мм. Анод из AlMg фольги толщиной ~ 50 мкм армированный сеткой с прозрачностью по свету $\sim 15\%$. в) — осциллограммы импульсов тока электронного пучка I через отверстие в приемной дисковой части шунте диаметром 1 мм (осциллограмма 1) и тока разряда i (осциллограмма 2) при давлении азота 10 Торр.

разряда и тока пучка за фольгой с задержкой между двумя импульсами ~ 250 пс. Отметим, что при малых давлениях азота, с газовыми диодами, подобными диоду на рис. 1, амплитуда напряжения на промежутке увеличивалась [22], а величина тока разряда уменьшалась.

3.3. Генерация двухкомпонентного импульса тока пучка при атмосферном давлении воздуха

В данной работе также ставилась задача по регистрации импульса с.л.э.п. с предельно возможным в наших условиях временным разрешением. Опыты были проведены на установке № 1 ($U_{max} \sim 280$ кВ, $\tau_f \sim 300$ пс) при межэлектродном зазоре 4–18 мм и заполнении газового диода воздухом атмосферного давления. Условия соответствова-

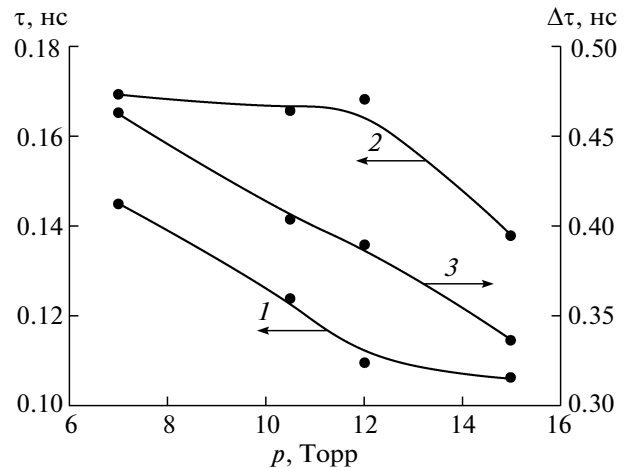


Рис. 6. Зависимости от давления азота длительности первого (кривая 1) и второго (2) импульсов тока пучка убегающих электронов на полувысоте, а также задержки между максимумами двух импульсов тока пучка убегающих электронов от давления азота (3).

ли генерации однокомпонентного импульса тока пучка (см. результаты экспериментов, описанных выше). Для измерений использовался цифровой осциллограф реального времени LeCroy WaveMaster 830Zi-A с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 12.5 пс (80 выборок за 1 нс). Данные записывались в режиме реальных точек, без применения дополнительных аппроксимаций. Ток пучка измерялся за диафрагмами из медной фольги толщиной 250 мкм. Диаметр отверстия в диафрагме равнялся 0.5, 1, 2, 4 и 6.5 мм. Использовался коллектор с диаметром приемной части 3 мм и временным разрешением ~ 25 пс. Перед диафрагмой помещалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм или сетка.

Полученные осциллограммы приведены на рис. 7. В этих условиях при давлении воздуха 760 Торр регистрировался только одиночный импульс тока с.л.э.п., как и на установке № 2 ($U_{ma} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) при этом же давлении азота и воздуха. Благодаря высокому временному разрешению удалось установить, что форма импульса тока пучка имеет сложную структуру, которая изменяется от импульса к импульсу. Наибольшие амплитуды с.л.э.п. за фольгой реализуются при треугольной (одиночный импульс) форме импульса тока, рис. 7а,б, и межэлектродном зазоре 12 мм. При диафрагме перед коллектором 2 мм и менее в ряде импульсов тока пучка регистрировались два максимума (двухкомпонентный импульс). Импульсы, состоящие из двух, рис. 7в, с большей вероятностью регистрируются при расстояниях между электродами больше и меньше, чем оптимальные зазоры (10–12 мм). Задержка между составляющими импульса составила 25–38 пс. Отметим, что данные задержки существен-

но меньше величин задержек между импульсами тока пучка, которые были зарегистрированы ранее [15–18] и в данной работе с генераторами № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) и № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс). Зарегистрированная двухкомпонентная структура импульсов с.л.э.п. отличается от режима генерации тока пучка в воздухе атмосферного давления, который получен в [13] при другой конструкции газового диода.

В ряде импульсов были зарегистрированы импульсы тока с.л.э.п. с разными амплитудами первого и второго импульсов, рис. 7гд. При увеличении диаметра диафрагмы (>2 мм) длительность импульса увеличивалась, рис. 7б, и двухкомпонентные импульсы не регистрировались. Замена фольги на сетку или отсутствие сетки при малых диаметрах отверстия в диафрагме (0.5, 1 и 2 мм) показали, что длительность импульса тока пучка и его амплитуда существенно не изменяются. Следовательно, доля электронов в пучке с энергией менее 30 кэВ при фронте импульса напряжения генератора ~300 пс сравнительно мала (не более 30%). При более длинном фронте импульса напряжения (эксперименты на установках № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) и № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс) и результаты работ [4, 20]) доля электронов пучка с малыми энергиями увеличивалась. Доля электронов пучка с малыми энергиями также увеличивалась при регистрации тока пучка с большей площади анода из фольги или сетки.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Генерацию импульсов тока пучка, состоящих из двух компонент, которые были зарегистрированы на установках № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) и № 3 ($U_{max} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс), можно объяснить пробоем промежутка за счет формирования двух волн ионизации. Волны ионизации при наносекундном пробое газов в трубках из диэлектрика, окруженных металлическим экраном, исследовались ранее в различных газах (см., например, обзоры [5, 6] и ссылки в них). Волны ионизации начинали свое движение от высоковольтного электрода. Формирование второй волны ионизации при отрицательной полярности импульса напряжения в [5] объяснялось образованием плотной плазмы на катоде в результате взрывной эмиссии электронов. В данных условиях формирование второй волны ионизации также можно связать с появлением плотной катодной плазмы в результате взрывной эмиссии электронов. Фронт первой волн ионизации, по-видимому, инициировала автоэлектронная эмиссия, за счет которой осуществлялась ионизация газа у катода с малым радиусом кривизны.

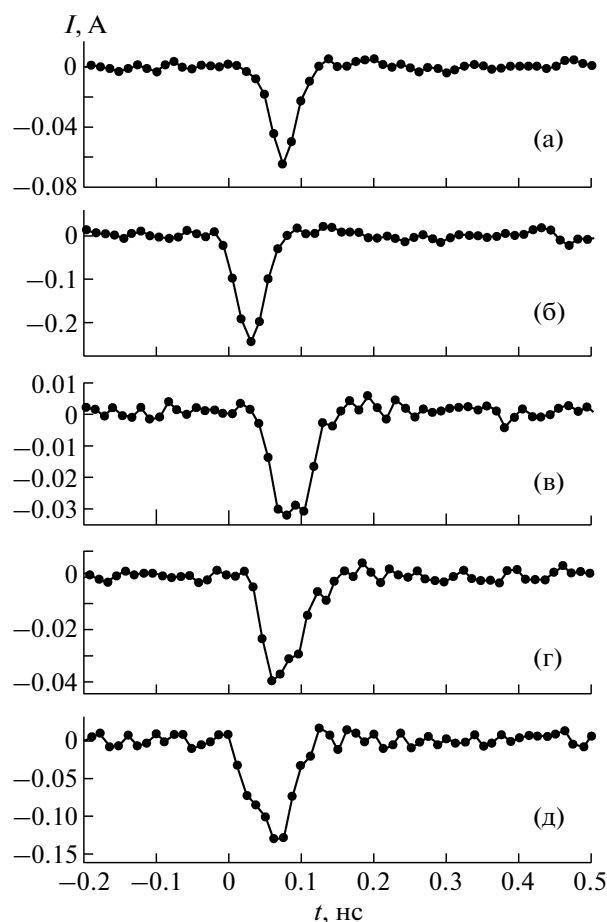


Рис. 7. Осциллограммы импульсов тока пучка убегающих электронов при давлении воздуха 760 Торр при регистрации через диафрагмы диаметром 1 мм (а, в) и 2 мм (б, г) при временном разрешении 25 пс.

Мы считаем, что движение двух фронтов волн ионизации от катода на установках № 2 ($U_{max} \sim 220$ кВ, $\tau_f \sim 0.5$ нс) и № 3 ($U_{ma} \sim 25$ кВ, $\tau_f \sim 2$ нс) стимулируют генерацию двух пучков убегающих электронов. Высокая скорость волны ионизации достигается благодаря быстрым электронам, которые появляются и ускоряются за счет усиления электрического поля у катода и в промежутке. Убегающие электроны осуществляют предыонизацию перед фронтом волны ионизации. Как известно, [5, 6, 23, 24], для быстрого продвижения фронта волны ионизации и стримера необходимо осуществлять предыонизацию перед фронтом волны ионизации. С другой стороны, поляризация фронта стримера [25] или волны ионизации [3–6, 23] ускоряет часть электронов.

В представленных выше экспериментальных данных, полученных на установке № 1 ($U_{max} \sim 280$ кВ, $\tau_f \sim 300$ пс), пока сложно объяснить причины появления одно- или двухкомпонентного импульса тока с.л.э.п. По-видимому, имеется две фазы

эмиссии электронов с катода, задержка между которыми изменяется. При оптимальной задержке генерируется одиночный импульс с наибольшей амплитудой тока пучка. Если же эта задержка не оптимальна, то наблюдается генерация импульсов с.л.э.п. с двумя максимумами и малой задержкой между этими максимумами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены экспериментальные исследования условий формирования пучков убегающих электронов, при которых во время одного импульса напряжения регистрируются один или два импульса тока пучка. Показано, что для реализации режима с двумя импульсами тока пучка необходимо уменьшать напряженность электрического поля E/p в промежутке или значение параметра E/p . Предполагается, что формирование двух волн ионизации, фронт которых движется от катода к аноду, определяет генерацию двух импульсов тока пучка убегающих электронов.

Установлено, что в условиях генерации одиночного импульса тока пучка и использовании импульса напряжения с фронтом ~ 300 пс за дифрагмами с диаметром менее 2 мм с.л.э.п. имеет сложную структуру, которая изменяется от импульса к импульсу, в том числе импульс тока может иметь два максимума (две компоненты). Наибольшие амплитуды тока пучка в этих условиях достигаются при генерации импульса с.л.э.п. с одним максимумом. Число двухкомпонентных импульсов увеличивается при увеличении и уменьшении межэлектродного зазора относительно оптимального.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”, ГК № 02.740.11.0562.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 564.
2. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 49.
3. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. // УФН. 2004. Т. 174. № 9. С. 953.
4. Tarasenko V.F., Baksh E.K., Burachenko A.G. et al. // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16. P. 267.
5. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. // УФН. 1994. Т. 164. № 3. С. 263.
6. Аникин Н.Б., Божженков С.А., Зацепин Д.В. и др. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. VIII—1 / Под ред. Ю.А. Лебедева, Н.А. Платэ, В.Е. Фортова. М.: Янус—К, 2005. С. 131.
7. Baksh E.K., Burachenko A.G., Kozhevnikov V.Yu., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. 305201.
8. Бабич Л.П., Лойко Т.В. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. С. 287.
9. Тарасенко В.Ф. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 444.
10. Yatom S., Vekselman V., Gleizer J.Z., Krasik Ya.E. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. 073312.
11. Shao T., Zhang C., Niu Z., Yan P. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. 021503.
12. Yatom S., Gleizer J.Z., Levko D. et al. // EPL. 2011. V. 96. 65001.
13. Gurevich A.V., Mesyats G.A., Zybin K.P. et al. // Phys. Lett. A. 2011. V. 375. P. 2845.
14. Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 94.
15. Бакит Е.Х., Тарасенко В.Ф., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 9. С. 29.
16. Baksh E.Kh., Tarasenko V.F., Lomaev M.I. et al. // Laser Physics. 2007. V. 17. P. 1124.
17. Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 43.
18. Бакит Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И. и др. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 98.
19. Dwyer J.R., Saleh Z., Rassoul H.K. et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D23207.
20. Бакит Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И. и др. // ПТЭ. 2007. № 6. С. 100.
21. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г. и др. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146.
22. Tarasenko V.F., Baksh E.K., Burachenko A.G. et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2010. V. 38. P. 2583.
23. Yakovlenko S.I. // Laser Physics. 2006. V. 16. P. 403.
24. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009.
25. Аскарьян Г.А. // Труды ФИАН. 1973. Т. 66. С. 66.