

Генерация убегающих электронов в неоднородном электрическом поле при наносекундных импульсах напряжения и частотах 100–1000 Hz

© М.В. Ерофеев, Е.Х. Бакшт, В.Ф. Тарасенко, Ю.В. Шутько

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

(Поступило в Редакцию 30 мая 2012 г.)

Проведены исследования генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения в гелии и воздухе при наносекундном импульсно-периодическом разряде в неоднородном электрическом поле. На промежуток „острие–плоскость“ подавались импульсы напряжения отрицательной и положительной полярностей с частотой до 1 kHz, длительностью ~ 1 ns и с амплитудой в падающей волне до 12.5 kV. Показано, что при обеих полярностях основного импульса напряжения и давлениях гелия единицы–десятки Torr приход на промежуток отраженных импульсов напряжения отрицательной полярности сопровождался генерацией электронного пучка. Рентгеновское излучение зарегистрировано в широком диапазоне давлений, в том числе при атмосферном давлении гелия и воздуха.

Введение

В последние годы получены новые экспериментальные данные о генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения при пробое промежутков с катодом, имеющим малый радиус кривизны, см., например, [1–14] и ссылки в [1–14]. В работах использовались различные газы и наносекундные генераторы с напряжением от десятков до сотен киловольт. Давление газа в разрядном промежутке составляло от долей Torr до нескольких атмосфер. Достигнуты амплитуды тока пучка в сотни ампер при длительности импульса на полувывоте 100–500 ps [4,14]. Однако исследования параметров пучков убегающих электронов при разрядах в неоднородном электрическом поле проводились в режиме однократных импульсов или при малых частотах. Это было связано с существенным уменьшением амплитуды тока пучка с ростом частоты следования импульсов (до 10 Hz и более), см., например, [15]. Рентгеновское излучение было зарегистрировано и при высоких (~ 1 kHz) частотах следования импульсов, но зафиксировать ток пучка убегающих электронов в этих условиях не удалось даже при напряжении генератора более 100 kV [10,15].

Известны также работы, в которых генерация пучков убегающих электронов изучалась в импульсно-периодическом режиме при напряжениях ~ 10 kV и менее, частотах следования импульсов до 1000 Hz, см. работы [16–21] и ссылки в них. В этих работах использовались малые и средние давления различных газов, короткие (~ 1 mm) разрядные промежутки со сравнительно однородным распределением электрического поля, а длительность импульса напряжения составляла десятки наносекунд и более. Электроны пучка в работах [16–21] выводились через сетку. В ряде работ для защиты коллектора от попадания плазмы приме-

нялась дополнительная защитная сетка [16], но аноды из фольги для предотвращения попадания низкоэнергетических электронов и плазмы разряда на коллектор не использовались, по-видимому, из-за малой энергии основного числа электронов в пучке.

Цель данной работы — исследовать генерацию пучков убегающих электронов в неоднородном электрическом поле при импульсно-периодическом разряде, формируемом в гелии и воздухе наносекундными импульсами положительной и отрицательной полярностей с частотой следования до 1000 Hz.

Экспериментальная установка и методики измерений

В экспериментах использовался генератор FPG-10 [22] с амплитудой импульсов напряжения положительной полярности в передающей линии до 12.5 kV. При работе на согласованную нагрузку длительность импульса напряжения на полувывоте составляла ~ 1 ns при длительности фронта ~ 0.2 ns на уровне 0.1–0.9. Блок-схема установки показана на рис. 1, а конструкция разрядной камеры на рис. 2. Для измерения амплитуды импульса

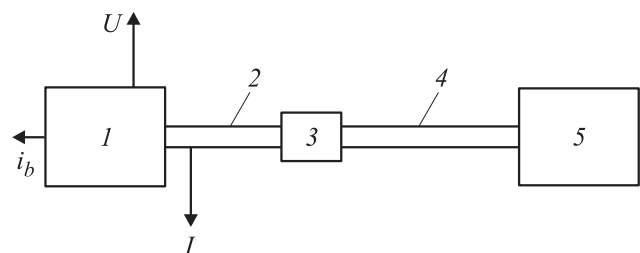


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 — разрядная камера, 2 — кабель № 1, 3 — инвертор, 4 — кабель № 2, 5 — генератор FPG-10.

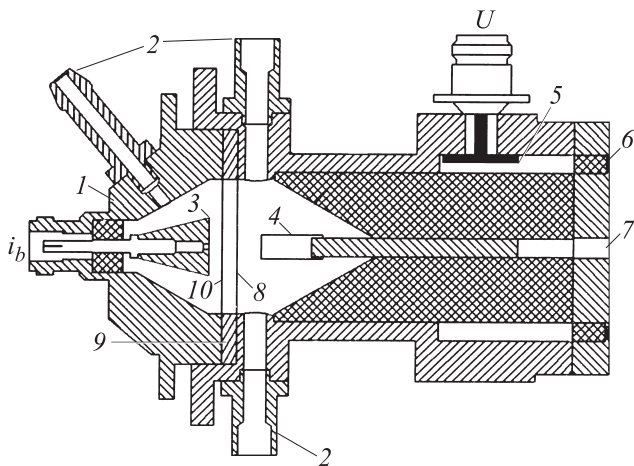


Рис. 2. Сборочный чертеж разрядной камеры: 1 — корпус коллектора, 2 — патрубки для напуска и откачки газа, 3 — приемная часть коллектора, 4 — трубчатый катод, 5 — емкостной делитель напряжения, 6 — шунт, 7 — отверстие для подключения высоковольтного кабеля, 8 — анод из сетки, 9 — металлическое кольцо толщиной 2 мм, 10 — экранная сетка.

напряжения U , подаваемого на разрядный промежуток, применялся емкостной делитель напряжения 5. Ток разряда I измерялся с помощью шунта 6. Число электронов в пучке и амплитуда тока убегающих электронов i_b определялись с помощью коллектора с диаметром приемной части 15 мм 3. Разряд формировался между двумя электродами, один из которых имел кромку с малым радиусом кривизны, а второй был плоским. В качестве потенциального электрода 4 использовалась трубка из титановой фольги толщиной $20\ \mu\text{m}$. Выбор электрода с малым радиусом кривизны в виде трубочки был обусловлен данными, которые были получены ранее. Как было показано в [1], ток пучка и энергия электронов при трубчатом катоде больше, чем при катоде в виде иглы. Плоский электрод 8 был изготовлен из никелевой сетки с прозрачностью по свету 30%. Для защиты коллектора от плазмы разряда между его приемной частью и анодом устанавливалась вторая сетка 10 из латуни с прозрачностью 40%. Кроме того, в ряде экспериментов на вторую сетку помещалась металлизированная (слой алюминия толщиной $0.2\ \mu\text{m}$) пленка из кимфоли ($\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$) толщиной $2\ \mu\text{m}$. Применение металлизированной пленки позволяло уменьшить влияние емкостного тока и электромагнитной помехи на измеряемый ток пучка, а также отсечь электроны пучка с энергией менее 10 keV.

Рентгеновское излучение регистрировалось по почернению рентгеновской пленки Kodak RAR film 2497 и дозиметрами Agrow-Tech, Inc (Model 138). Порог чувствительности дозиметра по оценкам соответствовал энергии квантов $\sim 5\ \text{keV}$. При энергии квантов 16 keV чувствительность дозиметра была на 20% меньше максимальной чувствительности, которая достигалась при энергиях 30–1000 keV. Дозиметры помещались на бо-

ковой стенке разрядной камеры или за окном, которое устанавливалось вместо коллектора. Рентгеновская пленка, помещенная в непроницаемый для света и мягкого рентгеновского излучения конверт с окном, располагалась на приемной части коллектора. Окно в конверте диаметром 6 мм закрывалось бериллиевой фольгой толщиной $15\ \mu\text{m}$ (длинноволновый край пропускания соответствовал энергии рентгеновских квантов $\sim 0.7\ \text{keV}$). В ряде экспериментов половина бериллиевого окна закрывалась фольгой из алюминия толщиной $10\ \mu\text{m}$.

Эксперименты проводились при положительной и отрицательной полярности импульсов напряжения, подаваемых на разрядную камеру. Так как генератор формировал импульсы напряжения только положительной полярности, то для получения импульса отрицательной полярности использовался инвертор 3 (рис. 1), в котором жила кабеля 4 соединялась с оплеткой кабеля 2, а оплетка с жилой. Благодаря короткой длительности импульса напряжения инвертор позволял менять полярность импульса напряжения, но при этом увеличивался уровень электромагнитных помех. Как при положительной полярности основного импульса, так и при отрицательной импульсы напряжения частично отражались от нагрузки (разрядный промежуток), а затем от генератора (при этом они меняли полярность) и снова попадали на разрядный промежуток. Таким образом, на промежуток приходила последовательность из основного импульса генератора и нескольких отраженных импульсов чередующейся полярности. При положительной полярности генератор подключался к разрядному промежутку 50-Ω кабелем длиной 100 см. При отрицательной полярности импульса длины кабелей 2 и 4 равнялись 90 и 100 см соответственно. Система регистрации помещалась в экран-комнату. Электрические сигналы с емкостного делителя, шунта и коллектора регистрировались цифровым осциллографом TDS-3054B (300 MHz, $2.5\ \text{GS s}^{-1}$). Фотографирование разряда осуществлялось цифровым фотоаппаратом Sony A100 через окно из кварцевой пластинки, которое устанавливалось вместо коллектора.

Формы разряда в гелии и воздухе

На созданной установке при работе в импульсно-периодическом режиме за счет изменения межэлектродного зазора можно было формировать коронный, диффузный и искровой разряды в широком диапазоне давлений. Фотографии диффузного разряда в гелии и диффузно-искрового в воздухе, полученные через сетчатый анод при разных давлениях на частоте 1 kHz, приведены на рис. 3. На электроде с малым радиусом кривизны при уменьшении межэлектродного зазора и увеличении давления, а также частоты следования импульсов появлялись яркие пятна плотной плазмы. При давлении гелия десятки Torr (рис. 3, *a, b*), как и в работе [23], на трубчатом электроде при низких давлениях яркие катодные или анодные пятна отсутствовали.

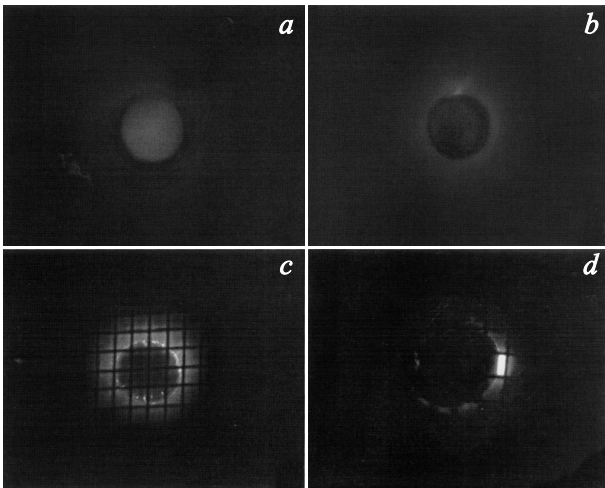


Рис. 3. Фотографии разрядной плазмы в гелии (*a, b, c*) и воздухе (*d*) при частоте повторения импульсов 1 кГц. *a* — He, положительная полярность, давление 20 Торг, зазор 10 мм; *b* — He, отрицательная полярность, давление 40 Торг, зазор 10 мм; *c* — He, положительная полярность, давление 1 атм, зазор 5 мм; *d* — воздух, положительная полярность, давление 1 атм, зазор 2 мм.

Плазма разряда примыкала к торцевой кромке и боковой поверхности трубчатого электрода. В этих условиях более яркое диффузное свечение разряда наблюдалось в месте соединения фольги, из которой изготовлялся трубчатый катод.

При уменьшении межэлектродного зазора до 5 мм диффузный разряд зажигался и при атмосферном давлении гелия (рис. 3, *c*). На кромке электрода с малым радиусом кривизны в этих режимах были видны яркие пятна. На рис. 3, *c* анодные пятна распределены по всей окружности трубчатого электрода, а также видны диффузные струи, перемикающие разрядный промежуток. При атмосферном давлении воздуха плазма разряда примыкала преимущественно к торцевой кромке электрода с малым радиусом кривизны, и также были видны яркие плазменные образования (рис. 3, *d*). Кроме того, в этих условиях на более поздних стадиях развития разряда формировался искровой канал, который имел наибольшую интенсивность излучения в видимом диапазоне.

Результаты эксперимента

Проведенные исследования показали, что рентгеновское излучение при атмосферном давлении воздуха и гелия можно зарегистрировать по засветке фотопленки при времени экспозиции в десятки минут. Причем засветка фотопленки наблюдалась не только при отрицательной полярности импульса напряжения, а также и при положительной. Часть полученных автографов приведена на рис. 4. При равном числе импульсов и давлении одна атмосфера почернение фотопленки в разряде в гелии заметно большее, чем при разряде в

воздухе (рис. 4, *a, b*). И в гелии, и в воздухе засветка фотопленки наблюдается и за дополнительным экраном из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм. Из этого можно сделать вывод, что засветка фотопленки происходит за счет рентгеновского излучения, а не за счет убегающих электронов, которые должны поглощаться алюминиевой фольгой. Отметим, что ранее [24] с данным генератором в воздухе атмосферного давления рентгеновское излучение было зарегистрировано с помощью сцинтиллятора и ФЭУ.

При регистрации рентгеновского излучения с анодами из разных материалов было установлено, что с анодом из вольфрама интенсивность рентгеновского излучения наибольшая. Из этого следует, что убегающие электроны достигают анода, в том числе в воздухе атмосферного давления. Однако ток пучка убегающих электронов с помощью коллектора при атмосферном давлении как воздуха, так и гелия зарегистрировать не удалось. Из этого следует, что для регистрации быстрых электронов при повышенных частотах следования импульсов и давлениях необходимо существенно увеличивать чувствительность системы регистрации.

При понижении давлений воздуха в газовом диоде до единиц Торг и гелия до десятков Торг сигнал с коллектора появился, и как показали проведенные измерения, он был связан с генерацией убегающих электронов.

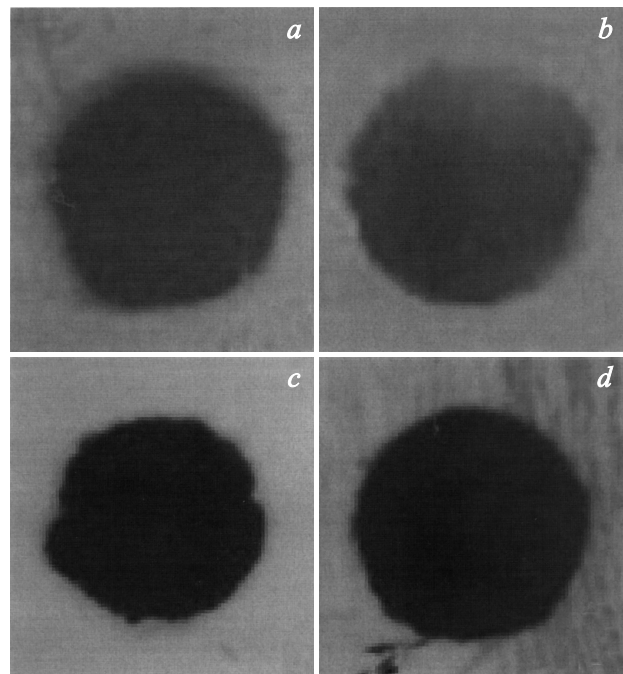


Рис. 4. Автографы рентгеновского излучения при частоте повторения импульсов 1 кГц и времени экспозиции 1 ч, *a* — He, зазор 5 мм, давление 1 атм, положительная полярность импульсов напряжения; *b* — воздух, зазор 2 мм, давление 1 атм, положительная полярность импульсов; *c* — He, зазор 10 мм, давление 80 Торг, отрицательная полярность; *d* — He, зазор 10 мм, давление 80 Торг, положительная полярность. Диаметр области почернения 6 мм.

В данных экспериментах впервые ток пучка убегающих электронов был зарегистрирован во время прихода на разрядный промежуток отраженных импульсов напряжения отрицательной полярности. При этом основной импульс, поданный на разрядный промежуток, мог иметь как отрицательную, так и положительную полярность. Было установлено, основной импульс напряжения в импульсно-периодическом режиме создавал у электрода с малым радиусом кривизны плазму, и это облегчало генерацию убегающих электронов при приходе на промежуток последующих (отраженных) импульсов напряжения отрицательной полярности. Кроме того, при пониженных давлениях гелия и воздуха пучок электронов регистрировался не только за сетчатым анодом и второй (экранной) сеткой перед коллектором, но и при установке на экранной сетке металлизированной пленки кимфоли. По-видимому, в этих экспериментах впервые удалось зарегистрировать пучок убегающих электронов при высоких частотах следования импульсов и сравнительно малых напряжениях за тонкой фольгой.

Основные эксперименты по измерению числа электронов пучка были проведены при заполнении разрядного промежутка гелием. Характерные осциллограммы импульсов напряжения (U), тока разряда (I) и тока пучка убегающих электронов (i_b) за металлизированной пленкой кимфоли при подаче на промежуток импульсов напряжения положительной полярности приведены на рис. 5. Частота следования импульсов составляла 100 Hz, а давление гелия 5 Torr. Как уже отмечалось, основной импульс напряжения отражался от разрядного промежутка, который имел в данных условиях высокое сопротивление, и от генератора, сопротивление которого после формирования импульса напряжения резко уменьшалось. За счет малого сопротивления генератора происходила инверсия импульса напряжения и к промежутку прикладывался отраженный импульс отрицательной полярности. Амплитуда отраженного импульса зависела от величины промежутка и давления гелия (рис. 6). Минимальные амплитуды отраженного импульса напряжения наблюдались при давлениях гелия 80–60 Torr и зависели от частоты следования импульсов. Соответственно при этих давлениях была наилучшая передача энергии от основного импульса напряжения в плазму разряда. При увеличении частоты следования импульсов амплитуда отраженного импульса уменьшалась, что можно связать с большей остаточной концентрацией электронов в промежутке.

При использовании воздуха и азота вместо гелия, как и в работе [25] при работе в режиме однократных импульсов напряжения с отрицательной полярностью, генерация пучка электронов наблюдалась при меньших давлениях и в более узком диапазоне давлений.

Зависимости среднего числа электронов от давления гелия приведены на рис. 7 для двух межэлектродных зазоров при установке металлизированной пленки из кимфоли перед коллектором и без пленки. Измерения были проведены при частоте следования импульсов 100

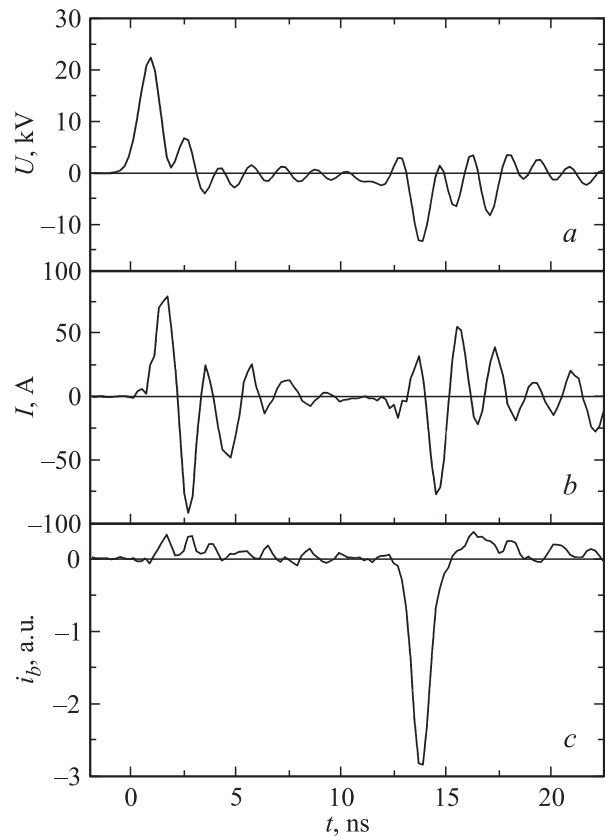


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения (a), тока разряда (b) и тока пучка убегающих электронов (c), регистрируемых коллектором, при частоте следования импульсов 100 Hz и давлении гелия 5 Torr.

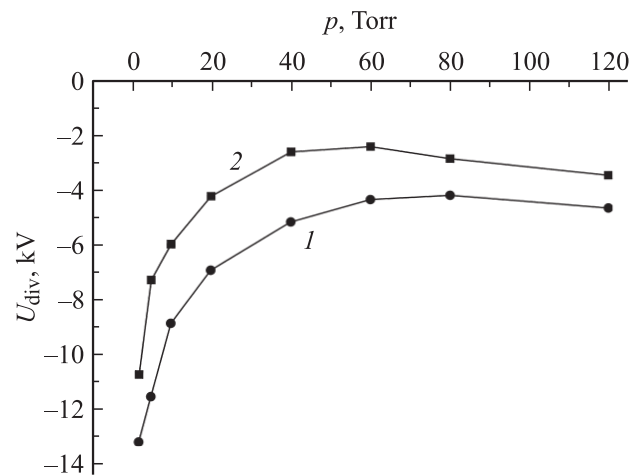


Рис. 6. Зависимости амплитуды отраженного импульса напряжения на емкостном делителе от давления при частоте следования импульсов 100 (1) и 1000 Hz (2). Межэлектродный зазор 10 mm.

и 1000 Hz. Видно, что число электронов, регистрируемых коллектором, увеличивается при уменьшении зазора и при уменьшении давления. Причем при давлениях гелия менее 10 Torr, как и в режиме однократ-

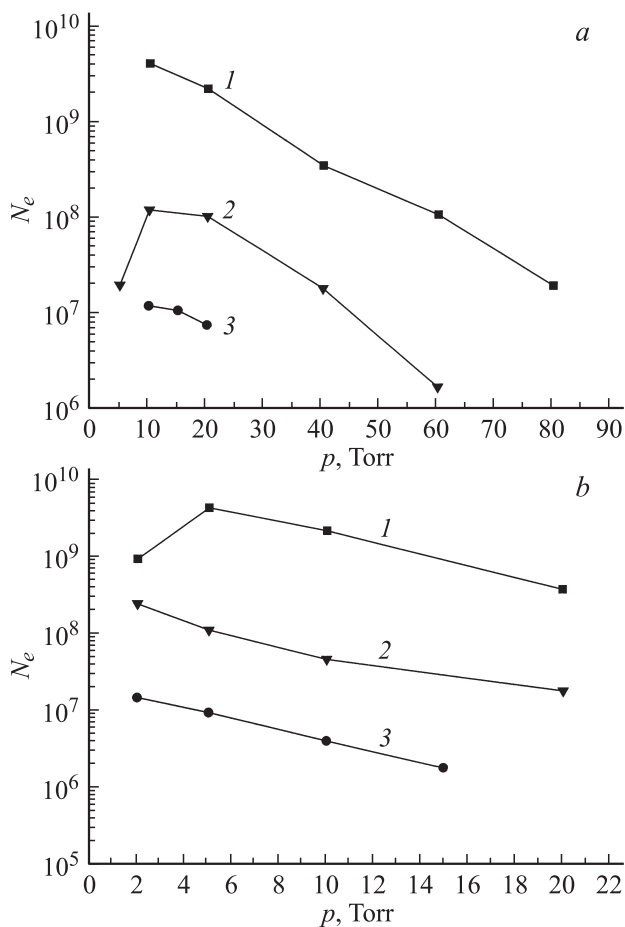


Рис. 7. Зависимости числа быстрых электронов, регистрируемых коллектором, от давления гелия при межэлектродных зазорах 5 (1) и 10 мм (2), а также частотах следования импульсов 100 (а) и 1000 Hz (b) (измерения без металлизированной пленки при положительной полярности импульса напряжения, подаваемого на промежутке). Кривые 3 соответствуют измерениям с металлизированной пленкой при положительной полярности импульса напряжения на промежутке 5 мм.

ных импульсов напряжения [4,23], ток пучка может уменьшаться. Число быстрых электронов, попадающих на коллектор, в отсутствие металлизированной пленки увеличивалось на два порядка. Из этого следует, что большая часть электронов, которые достигают коллектора, имеет энергию более 10 keV. Оценки показали, что пленка из кимфоли толщиной $2 \mu\text{m}$ с напыленным слоем алюминия $0.2 \mu\text{m}$ пропускает в основном электроны с энергией более 10 keV.

Для оценки минимальной энергии электронов, которые достигают коллектора, на него подавалось постоянное отрицательное напряжение. При величине смещения -200 V амплитуда тока быстрых электронов существенно не изменилась как при регистрации тока пучка за металлизированной пленкой, так и только за экранной сеткой. Следовательно, плазма разряда в этих условиях не попадала на коллектор и не влияла на регистрируемый ток пучка.

При отрицательной полярности импульса напряжения ток пучка в зависимости от давления гелия и частоты следования импульсов можно было зарегистрировать во время основного импульса напряжения, во время основного и двух отраженных импульсов напряжения отрицательной полярности, а также только во время отраженных импульсов напряжения. Так, при частоте следования импульсов 100 Hz пучок электронов регистрировался коллектором только при приходе на промежутке отраженных импульсов отрицательной полярности и только при давлении гелия менее 60 Torr. На рис. 8, а, b показана зависимость среднего числа быстрых электронов, регистрируемых коллектором, от давления гелия при межэлектродном зазоре 10 мм. С увеличением частоты до 1 kHz при давлении 120 Torr ток пучка электронов начинал регистрироваться во время основного импульса напряжения. Максимальное число электронов было зарегистрировано при давлении гелия 80 Torr. При малых давлениях (5–20 Torr) регистрировалось 3 импульса тока пучка электронов как во время основного импульса напряжения, так и во время отраженных импульсов отрицательной полярности. Причем амплитуда второго и третьего импульсов тока пучка электронов, а также число электронов в этих импульсах в оптимальных условиях были больше, чем при основном импульсе напряжения. При установке металлизированной пленки перед коллектором ток пучка электронов также регистрировался, однако, как и при положительной полярности основного импульса, число электронов в нем существенно уменьшалось.

Отметим, что дозиметрами Arrow-Tech, Inc (Model 1378) нам не удалось зарегистрировать рентгеновское излучение даже при оптимальных для тока пучка условиях и длительном экспонировании. Это объясняется малыми амплитудами импульса напряжения и поглощения рентгеновских квантов стенками разрядной камеры и выходным окном, которое устанавливалось вместо коллектора.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что в импульсно-периодическом режиме при напряжении генератора в падающей волне до 12.5 kV при давлениях гелия и воздуха единицы–десятки Torr пучок убегающих электронов стабильно регистрируется в широком диапазоне экспериментальных условий. При этом на генерацию пучка оказывают влияние предыдущие импульсы напряжения, а генерация пучка электронов стабильно наблюдается при отраженных импульсах напряжения отрицательной полярности. Можно предположить, что генерация тока пучка при малых напряжениях на промежутке в импульсно-периодическом режиме обусловлена предварительным созданием плазмы у электрода с малым радиусом кривизны, который при генерации тока пучка становится катодом. Так, при отрицательной

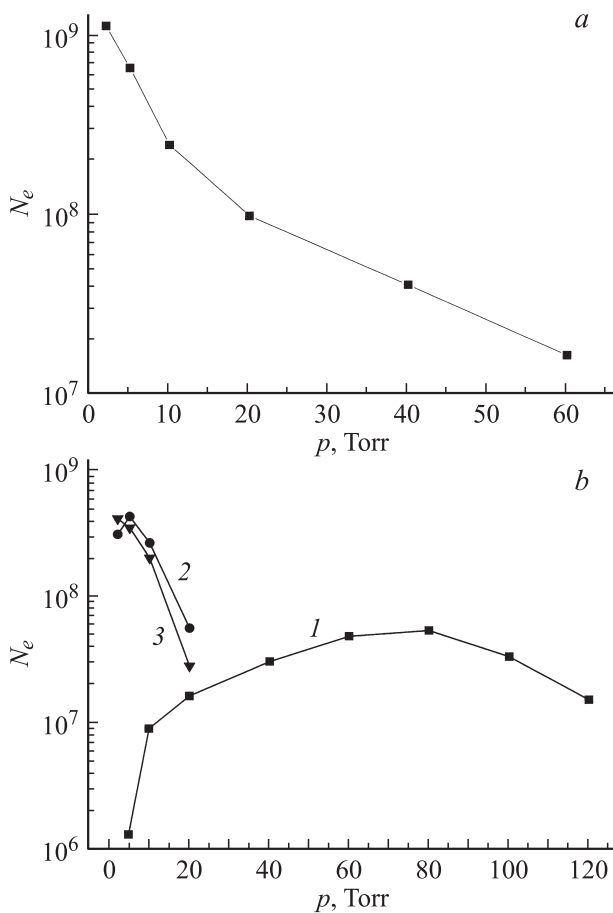


Рис. 8. Зависимости числа быстрых электронов, регистрируемых коллектором, от давления гелия при межэлектродном зазоре 10 мм и частотах следования импульсов 100 (а) и 1000 Hz (b). Измерения без металлизированной пленки при отрицательной полярности импульса напряжения, подаваемого на промежуток: 1 — количество электронов в пучке, соответствующем основному импульсу напряжения; 2 и 3 — количество электронов в пучках, возникающих при 1-м и 2-м отраженных импульсах напряжения при давлениях ниже 20 Торр.

полярности импульса напряжения и частоте следования импульсов 100 Hz генерация тока пучка при основном импульсе напряжения не была зарегистрирована. Из этого следует, что при такой частоте плазма разряда в паузе между основными импульсами успевает полностью прорекомбинировать, и напряжение пробоя промежутка восстанавливается.

При частоте следования импульсов 1000 Hz ток пучка начинает регистрироваться и во время основного импульса напряжения, причем в широком диапазоне давлений гелия. Это свидетельствует о наличии остаточной плазмы в промежутке. Мы считаем, что к приходу следующего основного импульса напряжения плазма у электрода с малым радиусом кривизны при частоте следования импульсов 1000 Hz не успевает полностью прорекомбинировать. Это также подтверждает то, что

генерация тока пучка при отраженных отрицательных импульсах происходит в независимости от полярности основного импульса, а также при частоте 100 Hz импульсов положительной полярности основного импульса. Так как задержки до прихода отраженных импульсов на промежуток составляют десятки наносекунд, то плазма, созданная за счет усиления электрического поля у электрода с малым радиусом кривизны основным импульсом, не успеет прорекомбинировать. Соответственно генерацию тока пучка во время отраженных импульсов отрицательной полярности обеспечить легче, и она наблюдается при меньших амплитудах импульса напряжения на промежутке.

Также следует отметить, что на генерацию тока пучка оказывало влияние состояние кромки электрода с малым радиусом кривизны и толщина фольги, из которой электрод был изготовлен. Стабильные режимы генерации тока пучка убегающих электронов были получены при уменьшении толщины титановой фольги с 50 до 20 мкм и при наработке на новом электроде менее 10^6 импульсов. При большом числе импульсов острая кромка трубчатого электрода притуплялась, что уменьшало при данных напряжениях генератора амплитуду тока пучка.

Мы предполагаем, что пучок убегающих электронов во многих режимах формируется между фронтом плотной плазмы, который движется от катода, и анодом [12]. По-видимому, в импульсно-периодических режимах при высоких частотах повторения наличие остаточной плазмы у катода облегчает генерацию тока пучка в последующих импульсах.

Заключение

В настоящей работе проведены исследования генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения в неоднородном электрическом поле при наносекундном импульсно-периодическом разряде. На промежуток „острие–плоскость“ подавались импульсы напряжения положительной и отрицательной полярности с частотой от 100 до 1000 Hz и амплитудой в падающей волне до 12.5 kV. При давлениях гелия единицы–десятки Торр и воздуха единицы Торр пучок убегающих электронов был зарегистрирован в различных режимах, в том числе за тонкой металлизированной пленкой. Показано, что генерация убегающих электронов при положительной полярности основного импульса напряжения наблюдается во время прихода отраженных импульсов напряжения обратной полярности на промежуток. Установлено, что при отрицательной полярности основного импульса напряжения в зависимости от частоты следования импульсов и давления пучок убегающих электронов регистрируется как во время прихода на промежуток основного импульса напряжения, так и во время отраженных импульсов отрицательной полярности. При атмосферном давлении гелия и воздуха и обеих полярностях импульса напряжения по засветке фотопленки

в импульсно-периодическом режиме зарегистрировано рентгеновское излучение. Однако ток пучка убегающих электронов в этих условиях существенно уменьшался и коллектором не регистрировался.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-08-00105_а, 12-08-00081_а и 12-08-91150-ГФЕН_а.

Список литературы

- [1] Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Козырев А.В., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Петин В.К., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шляхтун С.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 1. С. 51–59.
- [2] Мастюгин Д.С., Осипов В.В., Соломонов В.И. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 10–17.
- [3] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 21. С. 79–87.
- [4] Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Шутько Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 8. С. 60–67.
- [5] Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 111–117.
- [6] Бабиц Л.П., Лойко Е.В. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. Вып. 3. С. 287–294.
- [7] Baksht E.H., Burachenko A.G., Kozhevnikov V.Yu., Kozurev A.V., Kostyrya I.D., Tarasenko V.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol.43. P. 305 201.
- [8] Бойченко А.М., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 8. С. 142–149.
- [9] Yatou S., Vekselman V., Gleizer J.Z., Krasik Ya.E. // J. Appl. Phys. Vol. 109. P. 073 312.
- [10] Shao T., Zhang V., Niu Z., Yan P., Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Shutko Yu.V. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 98. P. 021 503.
- [11] Яландин М.И., Месяц Г.А., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 8. С. 56–64.
- [12] Тарасенко В.Ф. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 444–457.
- [13] Levko D., Yatou S., Vekselman V., Gleizer J.Z., Gurovich V.Tz., Krasik Ya.E. // J. Appl. Phys. 2012. Vol. 111. P. 013 303.
- [14] Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ПТЭ. 2012. № 1. С. 80–85.
- [15] Тарасенко В.Ф., Любутин С.Е., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Костыря И.Д., Орловский В.М. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 69–74.
- [16] Бохан П.А., Колбычев Г.В. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1823–1831.
- [17] Колбычев Г.В., Колбычева П.Д., Пташник И.В. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 2. С. 59–67.
- [18] Азаров А.В., Митько С.В., Очкин В.Н. // Квант. электроника. 2002. Т. 32. № 8. С. 675–679.
- [19] Бохан А.П., Бохан П.А., Закревский Д.М.Э. // ЖТФ. 2005. Т. 55. Вып. 9. С. 126–128.
- [20] Сорокин А.Р. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 2. С. 46–53.
- [21] Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 77–88.
- [22] Efanov V.M., Efanov M.V., Kamashko A.V., Kriklenko A.V., Yarin P.M., Zazoulin S.V. // Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9. 2010. Part. 5. P. 301–305. DOI: 10.1007/978-0-387-77845-7_35.
- [23] Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 12. С. 29–34.
- [24] Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Шутько Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 22. С. 26–33.
- [25] Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 1. С. 98–103.