

04

Моды разряда пеннинговского ионного источника при импульсном и стационарном режиме питания

© Н.В. Мамедов, С.П. Масленников, Ю.К. Пресняков, А.А. Солодовников, Д.И. Юрков

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
127055 Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
e-mail: vniia4@vniia.ru

Поступило в Редакцию 5 февраля 2019 г.

В окончательной редакции 5 февраля 2019 г.

Принято к публикации 21 марта 2019 г.

Для пеннинговского ионного источника (ПИИ) исследованы зависимости разрядного и вытягиваемого токов от давления при постоянном и импульсном режиме питания. Исследовано влияние амплитуды напряжения на аноде ПИИ, частоты следования импульсов, их длительности на амплитудно-временные и вольт-амперные характеристики ПИИ. Выявлены режимы работы ионного источника и соответствующие диапазоны давлений газа, при которых реализуются различные моды горения разряда Пеннинга.

Ключевые слова: Пеннинговский ионный источник, режимы горения пеннинговского разряда, амплитудно-временные характеристики, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48062.34-19

Введение

Пеннинговские ионные источники (ПИИ) на протяжении многих лет эффективно используются для решения широкого спектра задач в области ядерной физики, геофизики, микроэлектроники, медицины, приборостроения. Разработанные к настоящему времени и эксплуатируемые в различном современном технологическом оборудовании ионные источники работают как в непрерывном так и в импульсно-периодическом режимах включения [1,2].

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить существование нескольких мод горения разряда Пеннинга, реализация которых зависит от режимов работы системы электропитания, конструктивных параметров электродной системы, давления и рода рабочего газа, индукции магнитного поля [3–5]. В нескольких ранних обзорах [6–9], посвященных разряду Пеннинга, приведены диаграммы различных состояний разряда и описаны его основные параметры в зависимости от моды (режима) горения. Выделяют следующие моды: таунсендовский режим (или область зажигания) — Т (Townsend), слабого (низкого) магнитного поля — LMF (low magnetic field), сильного (высокого) магнитного поля — HMF (high magnetic field), „переходную“ — ТМ (transition mode), высокого давления — НР (high pressure) и область тлеющего разряда — GD (glow discharge). Данные моды влияют, прежде всего, на реальное распределение потенциала (в радиальном и осевом направлениях) внутри разрядной ячейки и, как показано в работах [8,10], определяют значения ионной и электронной компоненты разрядного тока.

В большинстве современных работ, посвященных исследованиям ПИИ, приводятся зависимости тока разряда от различных физических параметров (давления, напряжения на аноде, величины магнитного поля) в стационарном режиме питания [5,11–17]. В тоже время работ, в которых исследуется динамика зажигания разряда Пеннинга и его параметров при импульсной подаче напряжения на анод, крайне мало [3,18–20]. При этом для решения целого ряда практических задач требуются данные о параметрах разряда в его различных модах горения, а также вольт-амперные (ВАХ) и амплитудно-временные характеристики (АВХ) вытягиваемого тока. В частности, на основе АВХ вытягиваемого тока могут определяться интенсивность и форма нейтронной вспышки в нейтронных трубках [3,4,19].

Таким образом, исследование различных мод горения разряда в ПИИ, определение рабочих диапазонов давлений, выявление общих закономерностей режимов зажигания разряда в зависимости от параметров системы питания крайне актуальны для понимания физики горения разряда Пеннинга, а также при решении практических задач по созданию эффективных ПИИ для различных областей применения.

1. Экспериментальное оборудование и методика измерений

Создан экспериментальный стенд для исследования режимов работы ПИИ при реализации режимов питания как постоянного, так и импульсного тока. Исследуемые образцы ПИИ, изготовленные в виде отдельных конструктивных элементов, с помощью стандартного

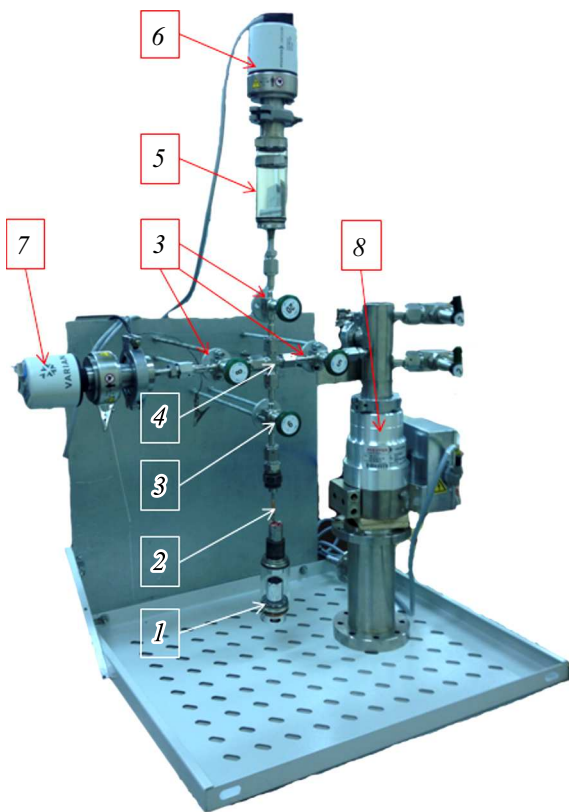


Рис. 1. Фотография вакуумной системы комплекса: 1 — ПИИ с системой извлечения ионов и мишени; 2 — стандартный откачной штенгель; 3 — клапаны Swagelok SS-4H; 4 — вакуумный крест Swagelok SS-400-4; 5 — «мерный объем»; 6 — датчик давления Varian FRG-702; 7 — датчик давления Pfeiffer PKR 251; 8 — турбомолекулярный насос Pfeiffer TC600. Предельное остаточное давление $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ Па. Рабочее давление $\approx (0.1-10) \cdot 10^{-1}$ Па.

откачного штенгеля подключаются к вакуумной системе экспериментального комплекса (рис. 1). Стенд состоит из стандартного вакуумного креста (фитинг Swagelok SS-400-4), четырех клапанов (Swagelok SS-4H), двух широкодиапазонных датчиков давления Pfeiffer PKR 251 и Varian FRG-702. Откачная система построена на основе турбомолекулярного насоса Pfeiffer TC600 и безмасляного мембранного насоса Vacuubrand MZ-2D.

Для определения взаимосвязи давления непосредственно в объеме ПИИ с показаниями вакуумметра проведены соответствующие расчетные оценки. Экспериментальная калибровка системы измерения давления в объеме ПИИ проводится с использованием дополнительного «мерного объема» (металлостеклянный баллон) с собственным встроенным геттером. Для квазистационарных режимов работы вакуумной системы, при которых не происходит существенного изменения давления за время измерений, использовался метод «постоянного давления», в условиях изменяющегося давления — «постоянного объема» [21]. Рабочим газом является дейтерий. Предельное остаточное давление

составляет $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ Па, рабочее давление варьируется от 10^{-2} до 1 Па.

На рис. 2 представлена схема питания и измерения параметров электрических сигналов на электродной системе ПИИ. Блок питания построен по двухтактной схеме формирования импульсов напряжения на нагрузке с частичным разрядом емкостного накопителя энергии $C1$ ($0.1 \mu\text{F}$, 4kV). Зарядку накопителя осуществляет источником питания тока ИП1 (Spellman SL10P300) через индуктивно-резистивную цепочку $L1 = 0.7 \text{H}$, $R1 = 820 \Omega$. Формирование импульса происходит при последовательном срабатывании коммутаторов $VT1$ и $VT2$. В зависимости от настройки коммутаторы переключаются с временной паузой от 0.5 до $1 \mu\text{s}$, что предотвращает протекание через них сквозных токов. Пиковые токи, возникающие при переключении коммутаторов, ограничиваются резисторами $R5 = 0.47 \text{k}\Omega$ и $R6 = 3.3 \text{k}\Omega$. Управление коммутаторами $VT1$ и $VT2$ осуществляется от внешнего двухканального генератора сигналов Tektronix AFG3022. Питание газогенератора (геттера) ПИИ осуществляется от источника ИП2 (АКИП-1129). Ускоряющее напряжение формируется высоковольтным источником питания ИП3 (Spellman SL 1200).

Для регистрации импульсов анодного и вытягиваемого токов из ПИИ используются резистивные шунты $R3 = 0.6 \text{k}\Omega$ и $R7 = 1.2 \text{k}\Omega$. Для ограничения амплитуд выбросов токов при переключении напряжений на электродах ПИИ параллельно шунту $R3$ установлен варистор $R4$ и защитный диод $VD1$. Анодное напряжение ионного источника U_a измеряется делителем напряжения Tektronix P6015A. Регистрация экспериментальных сигналов проводится осциллографом Tektronix DPO3014.

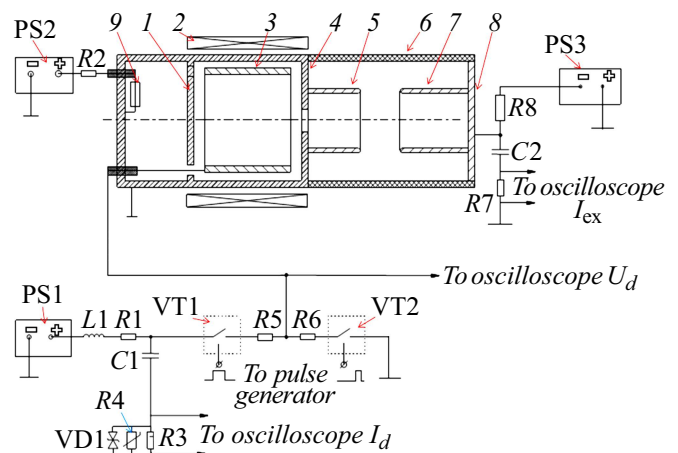


Рис. 2. Электрическая схема стенда в импульсном режиме питания: 1 — катод ПИИ; 2 — магниты ПИИ; 3 — анод ПИИ; 4 — антикатод ПИИ; 5 — фокусирующий электрод ПИИ; 6 — стеклянный изолятор; 7 — ускоряющий электрод ПИИ; 8 — мишень ПИИ; 9 — геттер (хранилище газа); PS1, PS2, PS3 — источники питания постоянного тока, VT1, VT2 — твердотельные коммутаторы.

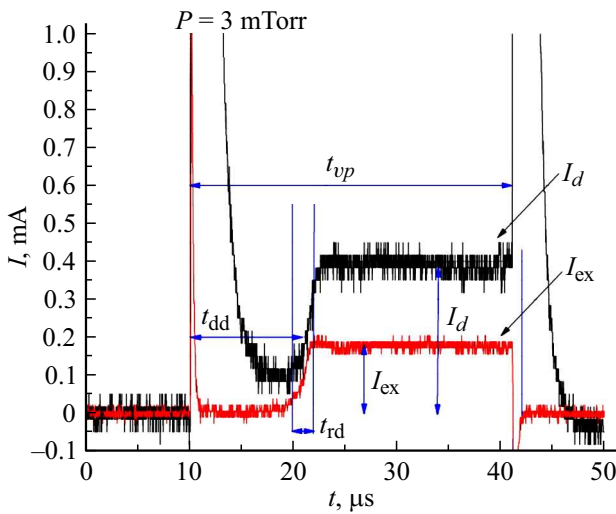


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока (I_d — ток разряда, I_{ex} — вытягиваемый ток). Начало импульса напряжения на 10-й микросекунде измерений.

Как показали калибровочные измерения, максимальная амплитуда импульсов напряжения, формируемых на аноде ПИИ, составляют 4 кВ, длительности переднего фронта и спада импульсов не превышают 0.1 μ s.

Разработанная в среде LabVIEW (National Instruments) автоматическая система управления стенда позволяет в режиме реального времени регулировать анодное и ускоряющее напряжения, регистрировать разрядный и вытягиваемый (экстрагируемые) токи, управлять режимами работы геттеров и измерять давление газа в ПИИ, определять параметры АВХ и ВАХ разряда Пеннинга, проводить оцифровку и запись показаний датчиков при проведении экспериментов и испытаний. Для создания управляющего контура с обратной связью по давлению в программе управления реализован виртуальный пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор.

На рис. 3 в качестве примера представлены импульсы тока разряда (I_d) и вытягиваемого тока (I_{ex}) при зажигании разряда Пеннинга в импульсно-периодическом режиме питания ($U_a = 2$ кВ, $f = 10$ кГц, $t_{vp} = 31$ μ s). Импульс разрядного тока, регистрируемый с помощью резистивного шунта в заземляющем контакте накопителя энергии, имеет два характерных кратковременных выброса на фронте и срезе импульса напряжения. Формирование этих выбросов тока связано с протеканием емкостных токов при перезарядке паразитных емкостей коммутаторов и нагрузки, а также коммутационных токов при переключении коммутаторов в блоке питания в момент формирования среза импульса напряжения. Для импульса вытягиваемого тока подобные выбросы (имеющие разную полярность) определяются протеканием через ячейку Пеннинга емкостных токов при высоких скоростях изменения напряжения (dU/dt) на электродах

ячейки. Внешний вид осциллограммы импульса вытягиваемого тока аналогичен представленной в работе [19].

2. Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования режимов работы ПИИ были проведены как для условий питания от высоковольтного источника постоянного тока, так и с использованием генератора прямоугольных импульсов напряжения. Амплитуда напряжения, подаваемого на анод ПИИ (U_a), регулируется от 1.5 до 3.0 кВ. Измерения амплитудных и временных параметров тока разряда (I_d) и экстрагируемого из ПИИ тока ионов (I_{ex}) выполнены в диапазоне давлений газа (дейтерий) $P = (0.1 - 10) \cdot 10^{-1}$ Па.

В импульсно-периодическом режиме питания ПИИ частота следования импульсов (f) изменялась от 0.5 до 10 кГц, диапазон регулировки длительностей импульсов составлял $t_{vp} = 30 - 150$ μ s. На ускоряющий электрод в нашем цикле экспериментов подавалось напряжение $U_{ex} = -20$ кВ, среднее значение индукции магнитного поля на оси разрядной ячейки ПИИ составляло $B_z = 100$ мТ.

В ходе исследований импульсных режимов работы были проведены измерения времени задержки токовой вспышки разряда (t_{dd}) и вытягиваемого тока (t_{dex}), а также длительности нарастания переднего фронта разрядного (t_{rd}) и экстрагируемого (t_{rex}) импульсных токов. Время задержки токовой вспышки определялось как интервал времени между моментом подачи на анод ИИ импульса напряжения и фронтом импульса тока разряда. Исследовано влияние амплитуды, частоты повторения и

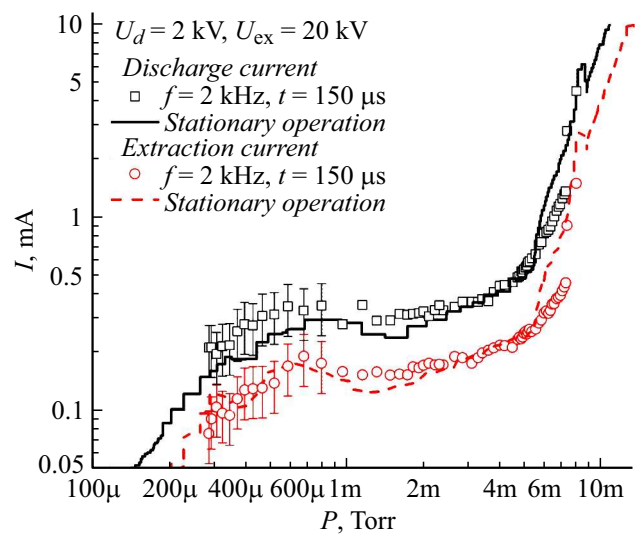


Рис. 4. Зависимость тока разряда I_d и вытягиваемого тока I_{ex} от давления в ГНТ при фиксированном напряжении разряда $U_d = 2$ кВ и вытягивающем напряжении $U_{ex} = 20$ кВ. Сплошные линии — постоянный режим питания, точки — импульсный режим питания (2 кГц, 150 μ s).

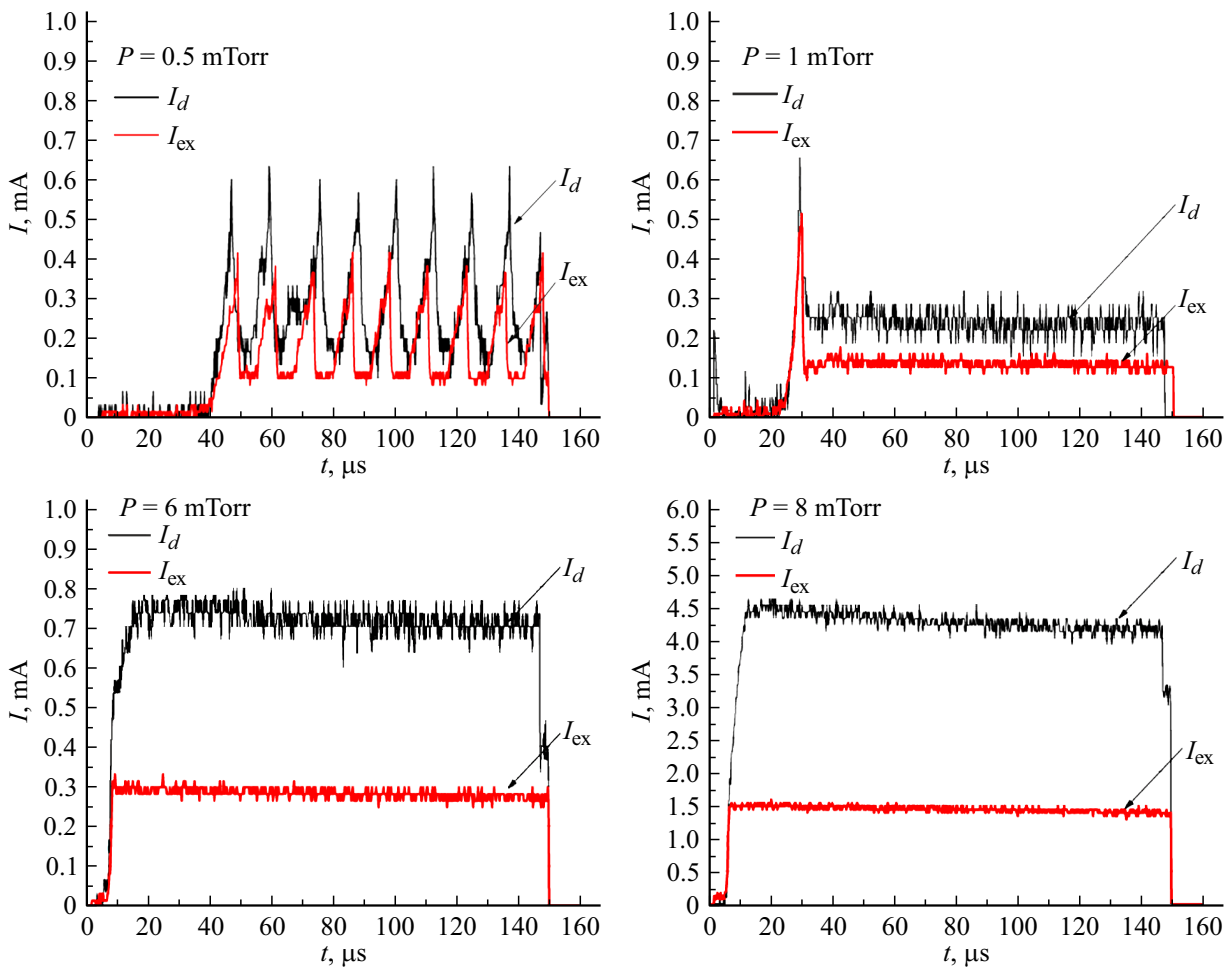


Рис. 5. Примеры осциллограмм токовых всплесков (частота 2 kHz и длительность 150 μ s).

длительности импульсов напряжения питания на АВХ и ВАХ ионного источника.

2.1. Сравнение стационарного и импульсного режимом питания анода

На рис. 4 представлены зависимости экстрагируемого тока I_{ex} и тока разряда I_d от давления газа в режимах постоянного (сплошные линии) и импульсного питания разряда (отдельные точки). Эти зависимости получены при анодном напряжении $U_a = 2$ kV, в импульсном режиме частота следования импульсов составляла $f = 2$ kHz, длительность напряжения $t_{vp} = 150$ μ s. На рис. 5 изображены примеры осциллограмм t_{vp} токовых импульсов при данных параметрах, но при различных давлениях.

Следует отметить, что при импульсном режиме питания разряд зажигается в диапазоне значительно больших давлений, чем при постоянном. Так, в частности, при частоте следования импульсов напряжения $f = 2$ kHz и их длительности $t_{vp} = 150$ μ s разряд горит только при давлении свыше $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ Pa. В этих условиях время задержки токовой вспышки разряда достигает ~ 60 μ s, также на осциллограммах наблюдается колебания тока

разряда с частотой ~ 100 kHz и максимальными амплитудами выбросов тока до ~ 0.5 mA (рис. 5, a). Подобные осцилляции фиксируются и на осциллограммах экстрагируемого тока. Такой неустойчивый режим горения разряда, при котором ток разряда то выходит на плато, то имеет выбросы треугольной формы, сохраняется до давлений $\sim 1 \cdot 10^{-1}$ Pa. Разброс значений амплитуд разрядного и экстрагированного токов в этом диапазоне давлений показан на рис. 4 в виде соответствующих вертикальных погрешностей. В диапазоне от $(1-2) \cdot 10^{-1}$ Pa осциллограммы могут иметь различный вид, чаще всего наблюдается один кратковременный треугольный выброс (рис. 5, b).

В диапазоне давлений от $(2-6) \cdot 10^{-1}$ Pa наблюдается устойчивое горение разряда, при котором осциллограммы приобретают трапецидальную форму (рис. 5, c). Амплитуда тока разряда при увеличении давления монотонно возрастает с ~ 200 до ~ 500 μ A, при этом вытягиваемый ток увеличивается от 150 до 300 μ A. Как видно из рис. 4, дальнейшее увеличение давления ($> 7 \cdot 10^{-1}$ Pa) приводит к резкому (экспоненциальному) повышению тока разряда (до значений выше 1 mA). Ха-

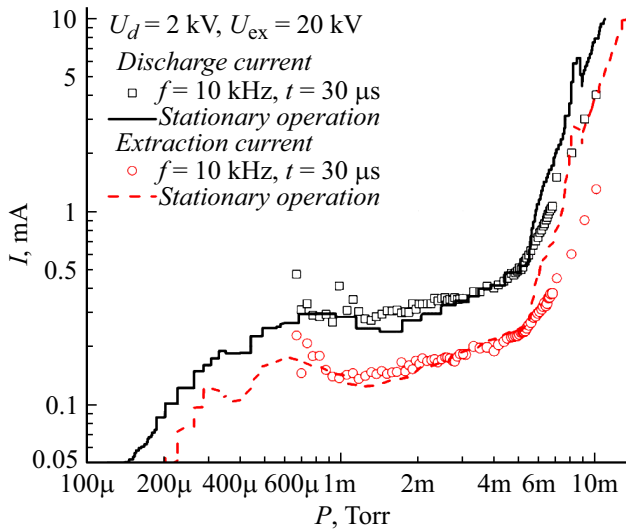


Рис. 6. Зависимость тока разряда I_d и вытягиваемого тока I_{ex} от давления в ПИИ при фиксированном напряжении разряда $U_a = 2$ kV. Сплошные линии — постоянный режим питания, точки и звездочки — импульсный режим питания (10 kHz, 30 μ s).

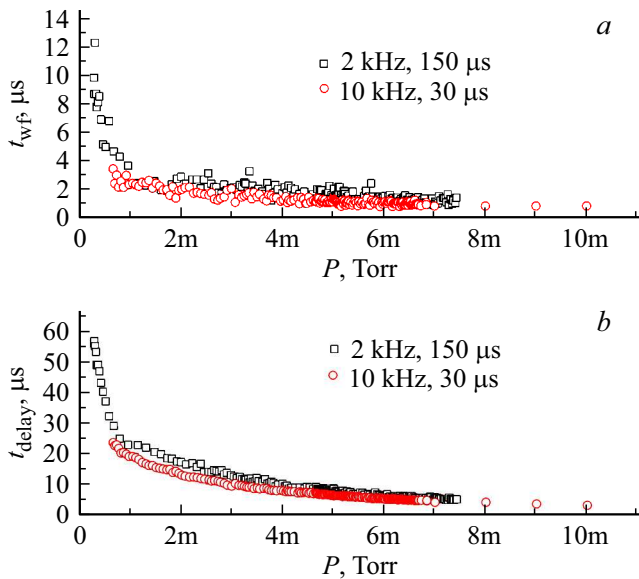


Рис. 7. *a* — зависимость времени задержки вспышки t_{dex} от давления, *b* — зависимость времени нарастания фронта t_{rex} от давления при режимах питания с частотой 2 kHz (длительностью 150 μ s) и частотой 10 kHz (длительностью 30 μ s). Напряжение разряда 2.0 kV.

рактерный вид импульсов разрядного и вытягиваемого токов при $P = 8 \cdot 10^{-1}$ Pa предоставлены на рис. 5, *d*.

2.2. Влияние частоты и длительности импульсов на АВХ

При тех же физических параметрах (напряжении на аноде и величине магнитного поля), но при увеличе-

нии частоты ($f = 10$ kHz) и уменьшения длительности импульсов ($t_{vp} = 30 \mu$ s) характерное поведение разряда остается прежним (рис. 6). Однако разряд стал зажигаться лишь при давлениях ~ 0.1 Pa. На рис. 7 показаны зависимости времени задержки вспышки t_{dex} и времени нарастания фронта t_{rex} от давления.

Так как, прежде всего, интересны характеристики вспышки на мишени, то временные параметры брались из осциллограммы вытягиваемого тока. Поскольку скорость ионизации прямо пропорциональна числу молекул газа, t_{dex} и t_{rex} должны изменяться обратно пропорционально давлению. В интервале 0.2–0.6 Pa увеличение длительности и уменьшение частоты привело к увеличению времени задержки, при этом время нарастания импульса тока не изменилось (рис. 7). Как видно из рис. 4 и 6 при увеличении давления с 0.3 до 0.8 Pa падает коэффициент извлечения α с 0.45 до 0.27.

При сохранении длительности (30 μ s) и уменьшении частоты с (10 до 1.5 kHz) наблюдалось увеличение времени задержки зажигания разряда t_{dex} (рис. 8). Данные эксперименты проведены при давлении газа $P \approx (0.5-0.6)$ Pa, при котором, как показали предшествовавшие исследования, создавались условия для стабильного зажигания разряда и его перехода в установившийся режим горения.

Полученные результаты позволяют предположить, что при импульсно-периодическом питании в разрядной области устанавливаются определенные равновесные условия между процессами наработки разрядной плазмы (в течение импульса напряжения питания) и процессами ее распада (в паузе между импульсами). Сокращение паузы между импульсами (увеличение частоты импульсов) при прочих равных параметрах способствует сохранению концентрации заряженных частиц в межэлектродном пространстве ПИИ и уменьшению времени,

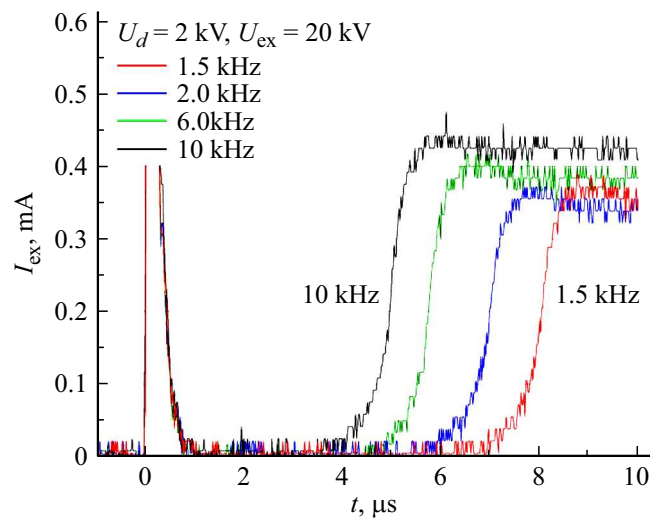


Рис. 8. Фронты импульсов вытягиваемого тока при различной частоте следования импульсов напряжения ($P = 0.6$ Pa). Амплитуды импульсов тока разряда нормированы на единицу. $f = 1.5, 2, 4$ и 10 kHz, длительность 30 μ s.

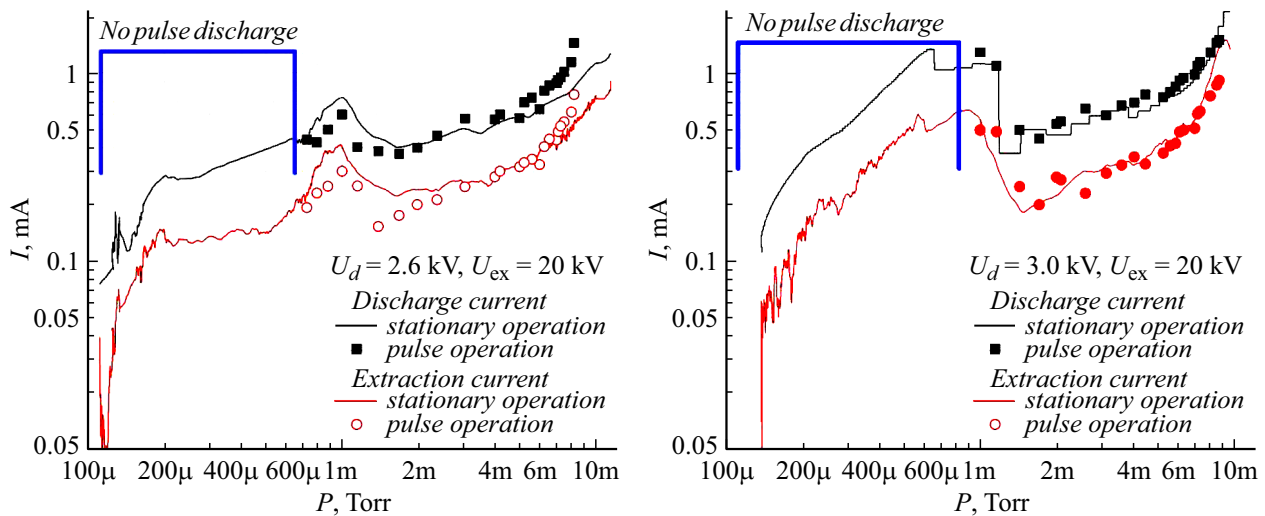


Рис. 9. Зависимость тока разряда I_d и вытягиваемого тока I_{ex} от давления в ГНТ при фиксированном напряжении разряда $U_a = 2.6$ kV, 3.0 kV. Сплошные линии — постоянный режим питания, точки — импульсный режим питания (10 kHz, 30 μ s).

затрачиваемому на зажигание разряда при поступлении очередного импульса напряжения.

2.3. Влияние анодного напряжения на АВХ

При постоянных напряжениях на аноде в пределах от 2.5 до 3.0 kV кривая зависимости тока разряда и вытягиваемого тока от давления незначительно смещается в сторону меньших значений давления, при этом ток разряда находится в диапазоне от 200 до 800 μ A при давлениях ниже 0.1 Pa. На рис. 9 показаны зависимости тока разряда I_d (черная) и вытягиваемого тока I_{ex} (пунктирная) при $U_a = 2.6$ и 3.0 kV. В качестве примеров на рис. 10 приведены характерные осциллограммы всплесков вытягиваемого тока при увеличенных напряжениях на аноде.

Как видно из представленных зависимостей, увеличение напряжения на аноде не привело к существенному сдвигу кривых $I_d(p)$ и $I_{ex}(p)$ в область более низких давлений. При импульсной схеме питания область зажигания разряда остается прежней от 0.8 до 0.1 Pa. Причем в области ~ 0.1 Pa форма всплески нестабильна и имеет либо треугольный выброс, либо колебания в максимуме (рис. 10, a). При высоких давлениях ($P > 0.4$ Pa) или при напряжениях выше 2.2 kV в осциллограмме появляется пик на переднем крае спектра (рис. 10, b).

Время переднего фронта импульса и время задержки разрядного тока уменьшается при увеличении давления и напряжения на аноде. Однако существенного улучшения АВХ в интервале 0.3–0.6 Pa не наблюдается (рис. 11). Например, при 0.3 Pa уменьшение времени задержки с 10 до 8 μ s. при увеличении напряжения на аноде с 2 до 3 kV (времени переднего фронта с 2.0 до 1.5 μ s). При $6 \cdot 10^{-1}$ Pa уменьшение времени задержки с 6 до 5 μ s (времени переднего фронта с 1.2 до 1.0 μ s) нивелируется возможной флуктуацией давле-

ния и погрешностью измерений. Полученные экспериментальные данные показали, что амплитудные значения разрядного и вытягиваемого токов увеличиваются как при росте давления, так и при повышении напряжения на аноде, однако существенного улучшения временных параметров развития разряда не наблюдается.

3. Обсуждение полученных результатов

По аналогии с работами [3,4] можно предположить, что нестабильность тока разряда при давлениях ~ 0.1 Pa (рис. 5 и 10) обусловлена колебаниями между соседними режимами (модами) горения разряда. В этой области давлений происходит понижение тока разряда при увеличении давления (так же, как и при постоянном режиме питания). Пользуясь терминологией [6,7], можно отметить, что при давлениях 0.1–0.2 Pa разряд переходит из режима слабого магнитного поля (LMF) в „переходной“ режим (TM).

Стабильное горение разряда (в диапазоне давлений) от 0.2 до 0.6 Pa, при котором осциллограммы имеют трапецидальную форму, можно качественно объяснить с помощью рассуждений приведенных в работах [3,18,22,23].

В начальный момент разряда основную роль в ионизации и развитии лавины играют электроны, вышедшие из центральной части катода. Электроны, эмитированные с краев катода, быстро уходят на анод, практически не участвуя в ионизации нейтрального газа. Электроны, вылетевшие из центра и движущиеся вдоль оси ячейки, наоборот, совершая осцилляции между катодами, имеют возможность ионизовать газ. Испытав соударение (как упругое, так и нет), первичные электроны получают радиальную компоненту скорости и начинают новые

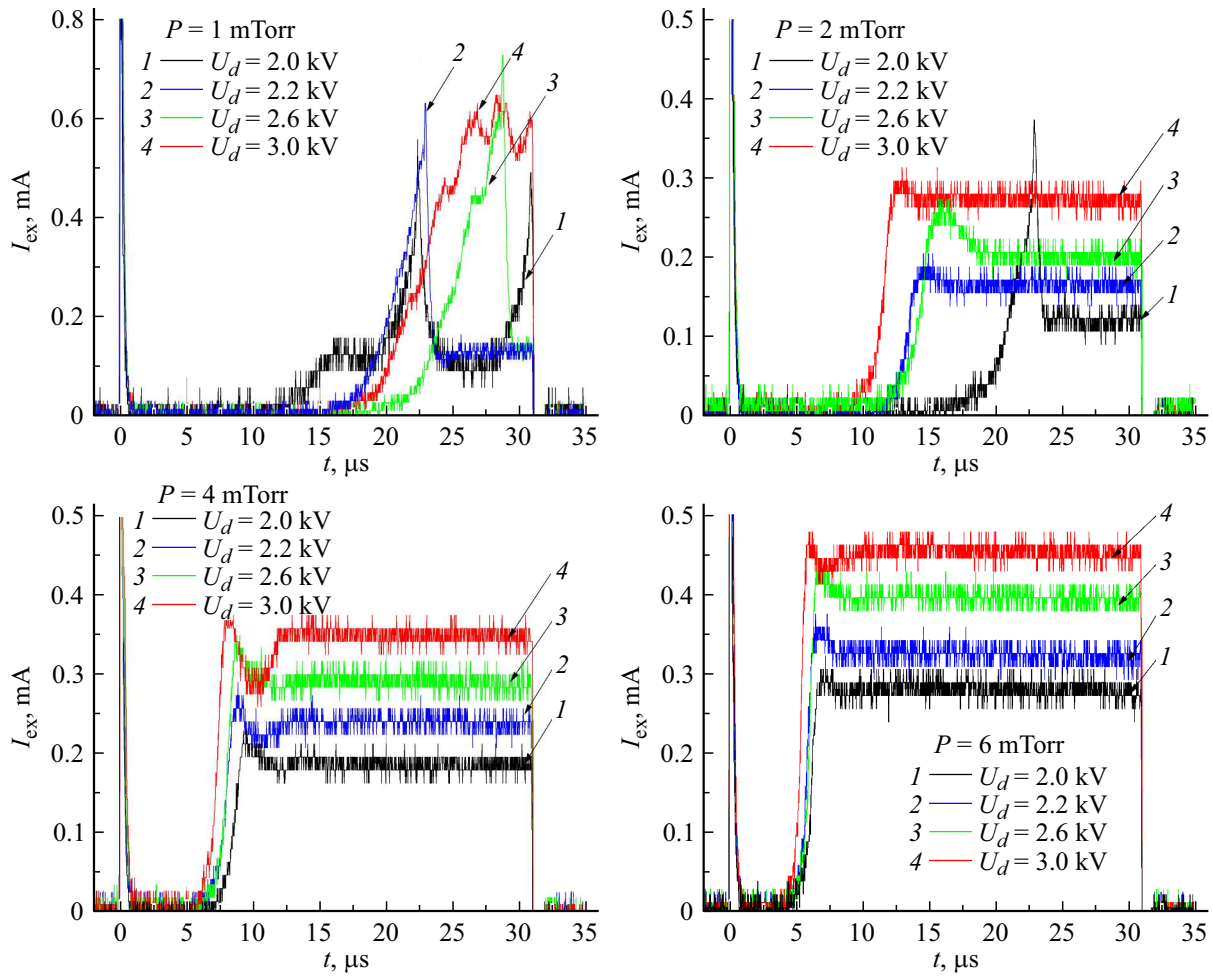


Рис. 10. Изменение осциллограмм импульсов вытягиваемого тока при различных напряжениях (для давлений 0.1–0.6 Па). Время начала импульса напряжения $t = 10 \mu\text{s}$.

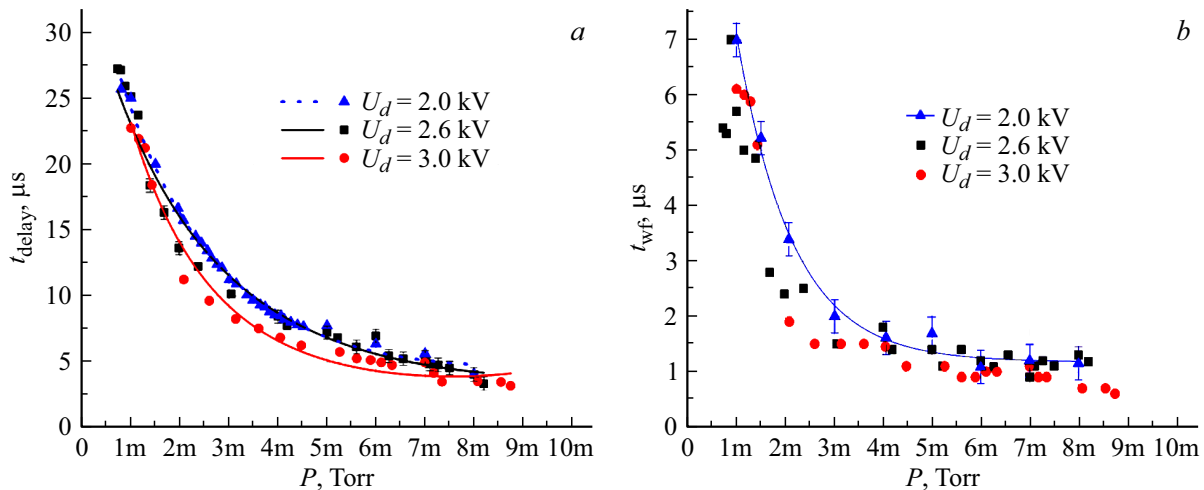


Рис. 11. *a* — зависимость времени задержки t_{dex} , *b* — зависимость времени нарастания фронта t_{rex} от напряжения на аноде в интервале давлений 0.08–0.9 Па.

колебания около плоскости симметрии, но на некотором расстоянии от оси. Если вторичный электрон образуется недалеко от катода, он ускоряется сильным

электрическим полем по оси z и также начинает участвовать в колебаниях по оси. Осцилляции происходят до следующего соударения на более близком расстоянии

от плоскости симметрии разряда, после чего электрон опять немного сдвигается в направлении анода. Медленные вторичные электроны возникают в результате ионизации в области анода (т.е. не далеко от плоскости симметрии ячейки), поскольку в этом месте электрическое поле по z мало. Это позволяет им легче удерживаться магнитным полем и участвовать в циклоидальном движении в плоскости, перпендикулярной к оси разряда. При таком „более“ медленном движении электроны испытывают соударения с атомами газа, постепенно смещаясь к аноду. Таким образом, основная лавина (основные процессы ионизации в объеме) образуется этими электронами. Т.е. электроны, колеблющиеся вдоль оси z , создают „первичные вторичные“ электроны, которые в дальнейшем и развивают лавину в плоскости, перпендикулярной оси z (по радиусу). Образовавшиеся ионы при этом ускоряются к катоду, уходя из области ионизации (так как магнитное поле мало для их удержания), при ударе их об катод образуются вторичные электроны. Сами ионы не вносят значительного вклада в количество ионизаций (поскольку их энергия слишком мала). Из-за короткого времени пребывания ионов в разрядной области образуется отрицательный объемный заряд. Это снижает скорость ухода ионов, компенсирующих падение потенциала. В этот момент времени разряд приближается к равновесию и ток разряда больше не растет. Как утверждают авторы [3,18], плавность осциллограммы на плато свидетельствует о том, что распределение потенциала в ПИИ остается практически неизменным при достижении равновесия. Следует обратить внимание, что анодный ток на плато эквивалентен току в непрерывном (стационарном) режиме питания при идентичном давлении газа. Это также отчетливо видно по рис. 4 при давлениях от 0.2 до 0.6 Па, подобный результат наблюдался в работе [19].

Поведение тока разряда при давлениях выше 0.7 Па, скорее всего, обусловлено тем, что равновесный анодный ток увеличивается линейно с давлением до переходной области (переход разряда в моду „высокого давления“), где происходит скачок тока разряда [3,6]. Аналогичный эффект был выявлен при работе ПИИ в составе нейтронной трубки [4].

Появление пика на передней части осциллограммы (при увеличении напряжения на аноде (рис. 10)), также указывало на приближение области перехода разряда в режим высокого давления (т.е. в режим с экспоненциальным ростом тока разряда). Аналогичный эффект наблюдался в работах [8,13].

Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований определены зависимости разрядного и вытягиваемого токов от давления при постоянном и импульсном питании пеннинговского ионного источника. Проведен сравнительный анализ АВХ и ВАХ разряда

Пеннинга при различных параметрах систем электропитания. Показаны различные (стабильные и не стабильные) моды горения разряда в зависимости от режимов питания и их диапазоны давлений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Penning F.M., Moubis J.H.A. // Physica. 1937. IV. N 11. P. 71–76.
- [2] Vladivoj Valkovic. 14MeV Neutrons. Physics and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, NY, 2016. 500 p.
- [3] Chen F.K. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. P. 3191–3197.
- [4] Burns E., Bischoff G. // AIP Conf. Proc. 1997. Vol. 392. P. 1207–1210. DOI: 10.1063/1.52633
- [5] Liu W., Li M., Gao K., Gu D. // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. 2014. Vol. 768. P. 120–123. DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.052
- [6] Schuurman W. // Physica. 1967. Vol. 36. P. 136–160.
- [7] Hooper E.B. // Adv. Electron. Electron. Phys. Vol. 27. NY.: Academic Press, 1969. P. 295–343.
- [8] Рейхрудель Э.М., Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ту // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 6. С. 1052–1060.
- [9] Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ту // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 6. С. 1044–1051.
- [10] Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ту // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 9. С. 1625–1631.
- [11] Sy A., Ji Q., Persaud A., Waldmann O., Schenkel T. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. 02B309. P. 1–3.
- [12] Yan F., Jin D., Chen L., Xiao K. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. A. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.07.071>
- [13] Das B.K. et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2012. Vol. 669. P. 19.
- [14] Liu W. et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A. 2014. Vol. 768. P. 120.
- [15] Rovey J.L., Ruzic B.P., Houlahan T.J. // Rev. Sci. Instrum. 2007. Vol. 78. P. 106101.
- [16] Mamedov N., Schitov N., Kanshin I. // Instruments Experimental Techniques. 2016. Vol. 59. N 6. P. 868–876.
- [17] Мамедов Н.В., Щитов Н.Н., Колодко Д.В., Сорокин И.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 8. С. 1164–1171. DOI: 10.21883/JTF.2018.08.46304.2396
- [18] Liberman A.D., Chen F.K. // Proc. SPIE. 1995. N 2339. P. 188–195.
- [19] Li G., Zhang Z., Chi Q., Liu L. // Nucl. Instrum. Method. Phys. Res. B. 2012. N 290. P. 64–68. DOI: 10.1016/j.nimb.2012.09.001
- [20] Oka Y., Tamagawa H. // SHINKU. 1973. Vol. 16. N 6. P. 208–216. DOI: 10.3131/jvsj.16.208
- [21] Пупко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. // Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979. 504 с.
- [22] Смирницкая Г.В., Рейхрудель Э.М. // ЖТФ. 1959. Т. 29. Вып. 2. С. 153–162.
- [23] Смирницкая Г.В., Нгуен Хыу Ту // ЖТФ. Т. 1969. 39. Вып. 4. С. 694–702.