

04.1

## Исследование параметров объемного газового разряда высокого давления при частоте следования импульсов до 100 kHz

© П.А. Бохан<sup>1</sup>, П.П. Гугин<sup>1</sup>, Д.Э. Закревский<sup>1,2</sup>, М.А. Лаврухин<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 15 мая 2024 г.

В окончательной редакции 4 июня 2024 г.

Принято к публикации 4 июня 2024 г.

Исследованы характеристики широкоапертурного объемного газового разряда в гелии в кювете объемом  $60 \text{ cm}^3$  при давлении газа вплоть до атмосферного при возбуждении импульсами с фронтами нарастания напряжения менее  $5 \text{ ns}$  и частотой следования до  $100 \text{ kHz}$  в режиме цуга. При атмосферном давлении получен объемный характер протекания импульсного тока амплитудой до  $50 \text{ A}$ , пиковой мощностью до  $2 \text{ MW}$  и средней мощностью до  $1.3 \text{ kW}$ .

**Ключевые слова:** газовый разряд, высокое давление, гелий, импульсное возбуждение, высокая частота следования импульсов.

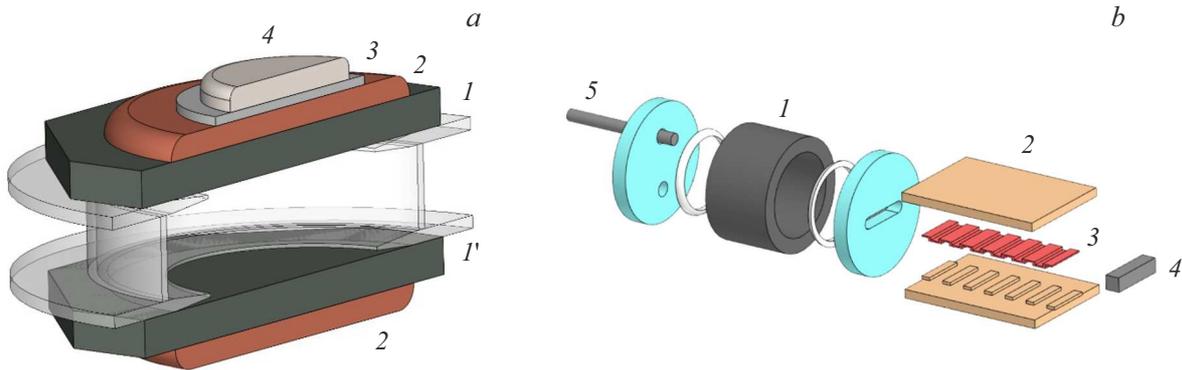
DOI: 10.61011/PJTF.2024.19.58648.19992

Настоящая работа направлена на развитие высокоэнергетических частотно-функционирующих электрофизических устройств высоковольтной техники нано- и субнаносекундного диапазонов. Целью работы является исследование широкоапертурного импульсного газового разряда в гелии при давлении до  $1 \text{ atm}$  и частоте следования импульсов до  $100 \text{ kHz}$ . Подобные разряды — разряды высокого давления с объемным характером протекания тока в инертных и молекулярных газах — представляют интерес как способ энергетического воздействия на активные среды газовых лазеров; для диссоциации сложных газообразных химических соединений; в быстродействующих высоковольтных коммутаторах и источниках заряженных частиц; в импульсных источниках высокочастотных колебаний; в плазмохимических и плазмобиологических реакторах и т.д. (см., например, [1–3]). При этом актуальным требованием является возможность их функционирования с объемной стадией протекания разрядного тока при большой частоте следования импульсов (десятки-сотни kHz). Такие возможности открываются при инициировании разряда высоковольтными импульсами с длительностями импульса напряжения меньше времени прохождения разрядного промежутка ионизационной волной. Это накладывает требование на скорость нарастания ( $\sim \text{kV}/(\text{cm}\cdot\text{ns})$ ) и длительность импульса напряжения (единицы-десятки ns).

Для исследования разряда использовалась кювета (рис. 1, *a*) с плоскими полированными электродами  $1, 1'$  с диаметром открытой части  $5.6 \text{ cm}$  и межэлектродным расстоянием  $2.4 \text{ cm}$  (разрядный объем  $60 \text{ cm}^3$ ). Толщина ограниченно проводящих электродов из реакционно-спеченного карбида кремния (SiC)  $8 \text{ mm}$ , удельное сопротивление  $0.5\text{--}1 \Omega\cdot\text{cm}$ . На наружной поверхности

электродов располагались медные контакты  $2$ , на один из которых приклеивалась диэлектрическая пластина  $3$  из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -керамики толщиной  $2 \text{ mm}$ . С другой стороны керамической пластины  $3$  присоединялся вспомогательный электрод-пластина из титана  $4$ . В результате между пластинами  $2$  и  $4$  образовывалась емкость  $C_d \approx 70 \text{ pF}$ . Собственная емкость разрядной кюветы  $\sim 6 \text{ pF}$ . Для возбуждения разряда напряжение можно было подавать в двух режимах: режим *A* — между электродами  $4\text{--}1'$  (режим включения емкости  $C_d$ , в этом случае предполагалось, что наличие  $C_d$  будет ограничивать развитие искрообразования и позволит улучшить устойчивость разряда — обеспечить условия, при которых сохраняется объемный характер протекания тока); режим *B* — непосредственно между электродами  $1\text{--}1'$  (режим замкнутой емкости  $C_d$ ).

Импульсный источник питания состоял из транзисторного генератора с повышающим трансформатором, линии магнитного сжатия и коммутатора. Схема источника аналогична использованной в [4]. Для обеспечения быстрого нарастания напряжения на разрядном промежутке в качестве коммутатора использовался эptron — разрядное устройство, функционирование которого основано на развитии тока при пробое капиллярной разрядной структуры с плазменным катодом [5]. Конструкция эптона представлена на рис. 1, *b*. Эptron состоит из цилиндрического катода из SiC с внутренним диаметром  $28 \text{ mm}$  и длиной  $25 \text{ mm}$ . С одной стороны катода устанавливалась капиллярная щелевая разрядная структура длиной  $50 \text{ mm}$ . Последняя представляла собой диэлектрический канал типа „меандр“ с шагом  $3 \text{ mm}$  с сечением щели  $0.3 \times 15 \text{ mm}$ . Геометрия щели ограничивала возможность генерации убегающих электронов с высокой энергией, достаточной для пролета по всей

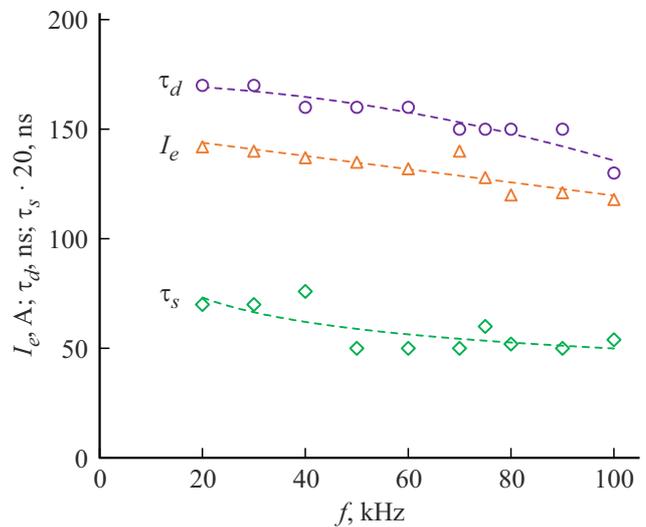


**Рис. 1.** *a* — конструкция разрядной кюветы: 1, 1' — SiC-электроды, 2 — медные контакты, 3 — пластина Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4 — вспомогательный электрод. *b* — конструкция энтрона: 1 — SiC-катод, 2 — капиллярная разрядная структура, 3 — зона протекания тока, 4 — анод, 5 — дополнительный электрод.

длине капилляра от плазменного катода до анода, и в ней сохранялись условия для быстрой рекомбинации плазмы в межимпульсный период. Снаружи капиллярной структуры располагался заземленный металлический экран (на рис. 1, *b* не показан). С одного конца капиллярной структуры располагался анод. С другой стороны катода энтрона для облегчения развития тока устанавливался дополнительный электрод, позволяющий подавать поджигающий импульс.

Эксперименты проводились в режиме цуга импульсов с периодом 0.1 с и частотой заполнения регулярными импульсами  $f = 5\text{--}100\text{ kHz}$ . Длина цуга  $\sim 20$  импульсов. Исследование динамики изменения параметров импульсов показало, что их параметры стабилизируются ко второму (третьему) импульсу и сохраняются на постоянном уровне до конца цуга. Все измерения проводились для последнего импульса в цуге.

В качестве рабочих сред энтрона использовались гелий и водород. Исследования показали, что меньшие времена коммутации ( $\sim 1\text{ ns}$ ) достигаются в гелии. Однако более удобным оказалось водородное заполнение, так как в широком диапазоне частот следования импульсов время задержки развития разряда  $\tau_d$  (время от момента достижения 0.1 амплитуды напряжения на ячейке до момента начала роста тока) меняется слабо. Это позволяет работать в разнообразных условиях без перестройки звеньев магнитного сжатия в цепях первичного питания. На рис. 2 приведены функциональные параметры энтрона при рабочем давлении водорода  $p_{\text{H}_2} = 1.1\text{ Torr}$  при работе на активную нагрузку: зависимости времени задержки развития разряда  $\tau_d(f)$ , амплитуды тока  $I_e(f)$  и длительности переднего фронта (по уровню 0.1–0.9) импульса тока  $\tau_s(f)$  от частоты следования  $f$  при амплитуде импульса напряжения  $U = 17.5\text{ kV}$ . Поджигающий импульс с энергией до 0.1 J (разряд емкости  $C = 2\text{ nF}$  при зарядном напряжении до 10 kV) мало влиял на характеристики энтрона до  $f \approx 70\text{ kHz}$ , но при больших частотах способствовал более стабильной работе устройства. Из рисунка видно, что при увели-



**Рис. 2.** Основные характеристики энтрона в зависимости от частоты следования импульсов:  $\tau_d(f)$ ,  $I_e(f)$  и  $\tau_s(f)$ .  $U = 17.5\text{ kV}$ ,  $p_{\text{H}_2} = 1.1\text{ Torr}$ .

чению  $f$  от 20 до 100 kHz время задержки развития разряда энтрона  $\tau_d$  уменьшается от 180 до 130 ns, амплитуда и длительность переднего фронта импульса тока меняются слабо ( $I_e \sim 140\text{--}120\text{ A}$  и  $\tau_s = 3.5\text{--}2.7\text{ ns}$  соответственно). Для давлений водорода  $p_{\text{H}_2} \approx 2\text{--}4\text{ Torr}$  при  $f \sim 5\text{--}60\text{ kHz}$  характерны времена  $\tau_d \approx 100\text{ ns}$  и менее с тенденцией значительного уменьшения  $\tau_d$  при увеличении напряжения и частоты следования импульсов, поэтому повышенные давления  $p_{\text{H}_2} > 1.1\text{ Torr}$  не использовались, несмотря на то что они приводили к уменьшению  $\tau_s \leq 2\text{ ns}$ .

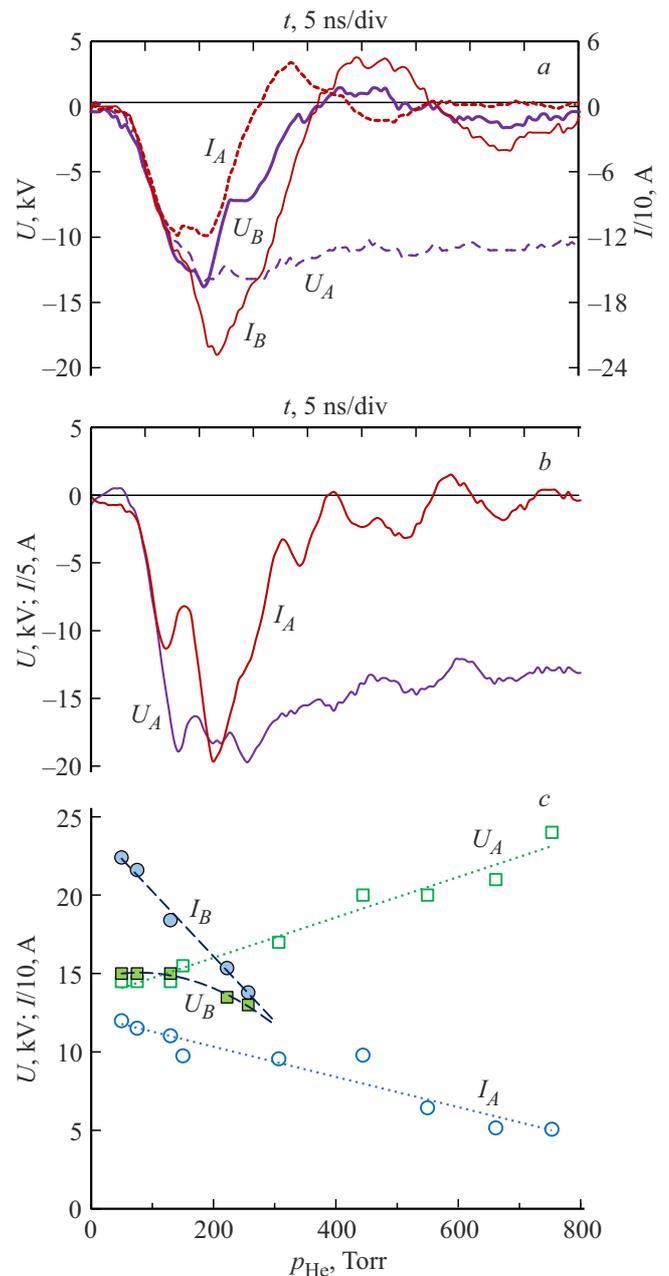
Инициирование разряда в кювете (рис. 1, *a*) осуществлялось при разряде рабочей емкости  $C_0 = 75\text{ pF}$  через энтрон. Регистрировались импульсы напряжения  $U$  (напряжение на электродах 1–1') и разрядного тока  $I$  (ток через шунт в цепи электрод 2–земля). Амплитуда импульсов напряжения на разрядном промежутке могла

меняться  $U = 2\text{--}24\text{ kV}$ , давление рабочего газа (гелия) до  $p_{\text{He}} \approx 1\text{ atm}$ .

При приложении напряжения к электродам в разрядном промежутке развивается ток, причем характер разряда зависит от режима подключения питания. Типичные осциллограммы напряжения  $U$  и тока разряда  $I$  приведены на рис. 3, *a* и *b*, например при  $p_{\text{He}} \approx 50\text{ Torr}$  и  $f = 65\text{ kHz}$  (рис. 3, *a*, режимы *A*, *B*) и при  $p_{\text{He}} \approx 450\text{ Torr}$  и  $f = 95\text{ kHz}$  (рис. 3, *b*, режим *A*). Первый пик на осциллограмме тока является током зарядки собственной емкости разрядной кюветы. Характерные длительности фронта импульса напряжения по уровню 0.1–0.9 составляют  $\tau_U \approx 3\text{--}4\text{ ns}$  (скорость нарастания напряжения до  $5\text{ kV/ns}$ ). Видно, что при подаче  $U$  на электроды 4–1' при включении емкости  $C_d$  (режим *A*) напряжение на электроде 1 после прохождения импульса тока остается практически постоянным, так как разряд  $C_d$  осуществлялся только через сопротивление датчика напряжения, а длительность тока определяется разрядом собственной емкости разрядного промежутка. Для получения устойчивого пробоя при увеличении  $p_{\text{He}}$  напряжение на рабочей емкости  $C_0$  было необходимо повышать с  $U = 19$  до  $24\text{ kV}$  (предельное напряжение первичного генератора). Несмотря на это, разрядный ток уменьшался при слабо меняющейся длительности импульса  $\tau_I = 8\text{--}6\text{ ns}$ . В этом режиме разряд устойчиво горит без искрообразования, по крайней мере вплоть до  $p_{\text{He}} \approx 1\text{ atm}$ . Фотографическая регистрация демонстрирует однородный характер свечения разряда.

При подаче  $U$  на электроды 1–1' при замкнутой емкости  $C_d$  (режим *B*) длительность импульса напряжения сокращается ( $\sim 8\text{ ns}$ ), длительность тока  $\tau_I \approx 10\text{ ns}$ . В этом случае при тех же напряжениях достигается почти в 2 раза больший ток. Разряд горит без искрообразования до  $p_{\text{He}} \approx 300\text{ Torr}$ , и при дальнейшем увеличении давления рабочего газа в разрядном промежутке наблюдаются множественные искровые каналы.

На рис. 3, *c* приведены зависимости от давления гелия  $p_{\text{He}}$  тока через кювету  $I(p_{\text{He}})$  и напряжения на ней  $U(p_{\text{He}})$  при  $f = 95\text{ kHz}$  для режимов *A* и *B*. В обоих случаях длительности импульсов тока не превышают времени прохождения ионизационного фронта через межэлектродное расстояние. Средняя скорость фронта ионизации в близких экспериментальных условиях  $\sim 10^8\text{ cm/s}$  [4]. Сравнение достигаемых параметров разряда демонстрирует, что в режиме *B*, несмотря на ограничение длительности импульса напряжения до  $\sim 5\text{--}6\text{ ns}$  и ожидаемое улучшение устойчивости разряда, увеличения диапазона функционирования разряда не происходит. Режим *A* — режим с включенной емкостью  $C_d$  — обеспечивает однородный объемный газовый разряд в большом диапазоне давлений, что, по-видимому, связано с ограничением амплитуды и длительности разрядного тока. В объемной стадии разряда в режиме *A* при  $p_{\text{He}} = 0.5\text{--}1\text{ atm}$  достижимая амплитуда тока составила  $I \approx 100\text{--}50\text{ A}$  с пиковой мощностью  $1800\text{--}900\text{ kW}$ .



**Рис. 3.** *a* — осциллограммы напряжения  $U$  и тока  $I$  в режимах *A* и *B* при  $p_{\text{He}} = 50\text{ Torr}$ ,  $f = 65\text{ kHz}$ ; *b* — осциллограммы напряжения  $U$  и тока  $I$  в режиме *A* при  $p_{\text{He}} = 450\text{ Torr}$ ,  $f = 95\text{ kHz}$ ; *c* — зависимости от давления гелия  $p_{\text{He}}$  амплитудных значений напряжения  $U$  и тока  $I$  в режимах *A* и *B*,  $f = 95\text{ kHz}$ .

Таким образом, в настоящей работе были проведены исследования функционирования газового разряда в гелии при давлении вплоть до атмосферного при возбуждении высоковольтными (до  $\sim 24\text{ kV}$ ) импульсами со скоростью нарастания до  $4\text{--}5\text{ kV/ns}$  в цуге импульсов при частотах следования до  $f = 100\text{ kHz}$ . При  $p_{\text{He}} = 1\text{ atm}$  получен объемный газовый разряд с импульсными токами до  $50\text{ A}$  и средней мощностью

до 1.3 kW. Результаты экспериментов показывают, что ограничение тока разряда позволяет обеспечить контролируемый и объемный характер протекания тока при атмосферном давлении гелия.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00037 (<https://rscf.ru/project/24-19-00037/>).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] T. Shao, Ch. Zhang, *Pulsed discharge plasmas: characteristics and applications* (Springer, 2023). DOI: 10.1007/978-981-99-1141-7
- [2] Y. Yin, H. Xu, Y. Zhu, J. Zhuang, R. Ma, D. Cui, Z. Jiao, *Appl. Sci.*, **13**, 12631 (2023). DOI: 10.3390/app132312631
- [3] K. Ollegott, P. Wirth, C. Oberste-Beulmann, P. Awakowicz, M. Muhler, *Chem. Ing. Tech.*, **92**, 1542 (2020). DOI: 10.1002/cite.202000075
- [4] P.A. Bokhan, P.P. Gugin, M.A. Lavrukhin, D.E. Zakrevsky, I.V. Schweigert, *Phys. Plasmas*, **30**, 103506 (2023). DOI: 10.1063/5.0164607
- [5] P.A. Bokhan, E.V. Belskaya, P.P. Gugin, M.A. Lavrukhin, D.E. Zakrevsky, I.V. Schweigert, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**, 084001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/ab9d91