

04

Особенности импульсного инициирования плазменной струи

© А.С. Боровикова¹, П.П. Гугин², Д.Э. Закревский^{1,2}, Е.В. Милахина^{1,2}, И.В. Швейгерт³¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия³Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: lena.yelak@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 июля 2022 г.

В окончательной редакции 12 августа 2022 г.

Принято к публикации 12 августа 2022 г.

Проведены исследования генерации холодной плазменной струи атмосферного давления в гелии при возбуждении однополярными положительными импульсами при напряжении 2–6 кВ и воздействии на диэлектрическую мишень из оксида алюминия. Показано, что основным параметром, влияющим на регулярный характер стримерного пробоя, является длительность импульса, а достигаемые параметры воздействия холодной плазмы на мишень идентичны таковым при синусоидальном возбуждении.

Ключевые слова: плазменная струя атмосферного давления, импульсное напряжение.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.19.53587.19308

В настоящее время активно развивается направление медицины, исследующее воздействие плазменных образований на биологические объекты (см., например, работы [1–3] и ссылки в них). Большие электрические поля и химические реакции у поверхности живой ткани при взаимодействии с холодной плазменной струей атмосферного давления (ХПС) приводят к изменению состава активных радикалов и ионов в клетках, что позволяет управлять биологическими процессами в клеточных культурах различного типа. Особое внимание привлекают возможности ХПС для подавления жизнеспособности раковых клеток.

Одним из способов генерации плазменной струи является приложение к электродам синусоидального или однополярного импульсного напряжения. Катодонаправленные стримеры формируются положительным напряжением и распространяются по потоку инертного газа, прокачиваемого через устройство в окружающее пространство, и формируют плазменную струю. В работе [4] при воздействии ХПС на мишень обнаружен нерегулярный характер стримерного пробоя — эффект частотной самоорганизации, не наблюдаемый при свободном распространении струи. В зависимости от амплитуды U , частоты прикладываемого синусоидального напряжения f_U , расстояния от сопла до мишени z и типа мишени частота импульсов тока, регистрируемых вблизи мишени f_I , не совпадает с f_U . Характер нерегулярности определяется соотношением плотности плазмы, образующейся в головке стримера, и остаточной плотности плазмы над поверхностью мишени. Только часть стримеров достигает поверхности мишени, тогда как остальные затухают при взаимодействии с облаком квазинейтральной плазмы, наработанной предыдущими стримерами. В работе [5] в сравнительных исследованиях инициирования ХПС синусоидальным и импульсным напряжением показано, что в первом случае частота касания

мишени импульсами тока f_I равна или кратна частоте прикладываемого напряжения: $f_I \approx f_U, f_U/2, f_U/3$ или $f_U/4$ ($f_U \approx 52$ kHz). Отметим, что при небольших U и f_U распространение стримеров носит регулярный характер, но в этом случае интенсивность взаимодействия плазмы с мишенью является недостаточной для эффективного подавления жизнеспособности раковых клеток. При импульсном инициировании с частотой следования импульсов f_0 регулярный характер распространения стримеров $f_I = f_0$ сохранялся при всех исследованных в работе [5] условиях возбуждения. В последующих биофизических экспериментах оказалось, что при определенных условиях и в этом случае $f_I \neq f_0$.

Неоднозначность параметров функционирования электрофизических устройств — источников плазмы — и соответственно неопределенность параметров облучения биологических объектов не позволяют транслировать метод плазменного воздействия в биофизические эксперименты и клиническую практику. Поэтому целью настоящей работы является исследование особенностей динамики стримерного пробоя и параметров плазменной струи при инициировании однополярными положительными импульсами.

В работе для генерации ХПС использовался генератор импульсов с регулируемой частотой следования $f_0 = 5–40$ kHz. Прямоугольный импульс формировался двухтактным транзисторным преобразователем с импульсным повышающим трансформатором. Первый транзистор формировал фронт и полку импульса, второй обеспечивал его срез. Ограничение переходных процессов на фронте и срезе импульса достигалось использованием резистивного балласта на выходе трансформатора. Амплитуда напряжения $U = 2–6$ кВ ограничивалась для обеспечения безопасных условий воздействия ХПС в будущих экспериментах с моделями животных. Длитель-

ность импульса (по основанию) изменялась в диапазоне $\tau = 6-20 \mu\text{s}$.

Аналогично данным работы [5] источник ХПС представлял собой коаксиальный диэлектрический канал длиной 100 mm с внутренним диаметром 8 mm с соплом на конце канала в виде капилляра с диаметром 2.3 mm. Разрядная зона формировалась двумя электродами. Напряжение прикладывалось к внутреннему стержневому электроду длиной 50 mm и диаметром 2 mm, который располагался в центре диэлектрического канала. Заземленный электрод в виде кольца размещался в конце диэлектрического канала на его внешней поверхности. Измерения напряжения U проводились высокоомным делителем. В качестве мишени использовалась диэлектрическая пластина Al_2O_3 толщиной 1 mm. Измерения тока проводились у поверхности мишени, расположенной на расстоянии от сопла $z = 25 \text{ mm}$ перпендикулярно оси распространения ХПС. Величина z выбиралась из стандартных условий экспериментов по воздействию ХПС на культуральные среды и подопытных животных. Датчик тока представлял собой 16 симметрично и параллельно расположенных SMD-резисторов. Резисторы располагались по окружности между двумя соосными кольцами из медной фольги разного диаметра на пластине из оксида алюминия, которая позиционировалась таким образом, чтобы струя плазмы (диаметр струи в месте контакта с мишенью был $\sim 2 \text{ mm}$) попадала в центр меньшего кольца [4]. Подобная геометрия датчика позволяла проводить измерения тока, растекающегося по мишени.

При прокачке через канал рабочего газа — гелия марки А (чистота 99.995%) — со скоростью потока $v > 11 \text{ l/min}$ и приложении однополярных положительных импульсов к электродам в разрядном промежутке зажегся разряд и при превышении некоторого U формировалась плазменная струя, выходящая за пределы канала. Амплитуда импульса напряжения, при которой ХПС достигала мишени, составляла $U > 3 \text{ kV}$ и слабо зависела от длительности импульса. Пространственная локализация плазменной струи определялась геометрией канала, размером капилляра, скоростью потока газа и напряжением. В оптимальных условиях при $U \approx 3-4 \text{ kV}$, $v = 5-10 \text{ l/min}$ длина струи достигала $\sim 50 \text{ mm}$.

На рис. 1 приведены осциллограммы напряжения U и тока I при $\tau = 8$ и $15 \mu\text{s}$. Для равных напряжений с увеличением τ время задержки развития тока τ_d увеличивается, а для импульсов с одинаковыми τ при увеличении U величина τ_d уменьшается.

На рис. 2 представлены зависимости амплитуды тока у поверхности мишени от амплитуды напряжения $I(U)$ для длительностей импульса возбуждения $\tau = 6, 7, 10, 12$ и $15 \mu\text{s}$ при $v = 9 \text{ l/min}$, представляющие собой сублинейные кривые, характер которых коррелирует с результатами работы [5]. Из рис. 2 видно, что при $U > 4.2 \text{ kV}$ и прочих равных условиях большие амплитуды тока достигаются для импульсов с меньшими τ , а при $U < 4.2 \text{ kV}$ с большими τ достижимы большие

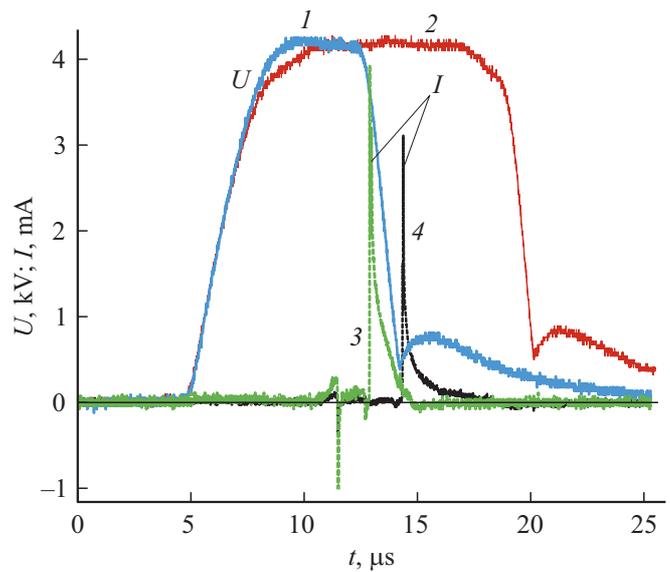


Рис. 1. Осциллограммы U (1, 2) и I (3, 4) при длительностях импульса возбуждения $\tau = 8$ (1, 3) и $15 \mu\text{s}$ (2, 4). $v = 9 \text{ l/min}$, $f_0 = 30.6 \text{ kHz}$.

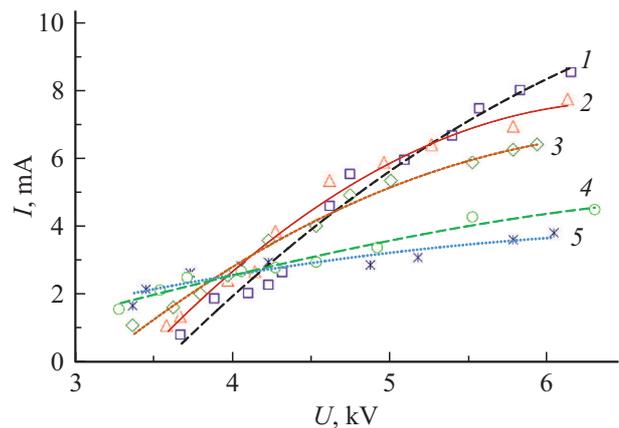


Рис. 2. Зависимости $I(U)$ при длительностях импульса возбуждения $\tau = 6$ (1), 7 (2), 10 (3), 12 (4) и $15 \mu\text{s}$ (5) при $v = 9 \text{ l/min}$, $f_0 = 30.6 \text{ kHz}$.

амплитуды тока. Увеличение скорости потока рабочего газа приводит к увеличению амплитуды тока. Так, например, при $U \approx 4.2 \text{ kV}$, $\tau = 12 \mu\text{s}$ при увеличении v с 3 до 9 l/min ток увеличивается в ~ 2 раза. Максимальная амплитуда тока ХПС, достигающего мишени, $\sim 10 \text{ mA}$, что соответствует при прочих равных условиях аналогичным параметрам при синусоидальном инициировании [5]. Исследования спектроскопических параметров зоны взаимодействия ХПС с культуральной средой продемонстрировали, что укорочение длительности импульса возбуждения приводит к увеличению интенсивности линии гидроксида OH ($\lambda \approx 309 \text{ nm}$, переход $A^2\Sigma - X^2\Pi$).

Были проведены исследования частотных параметров ХПС — зависимостей $I(f)$ при фиксированной амплитуде напряжения $U = 4.2 \text{ kV}$ и длительностях импульса

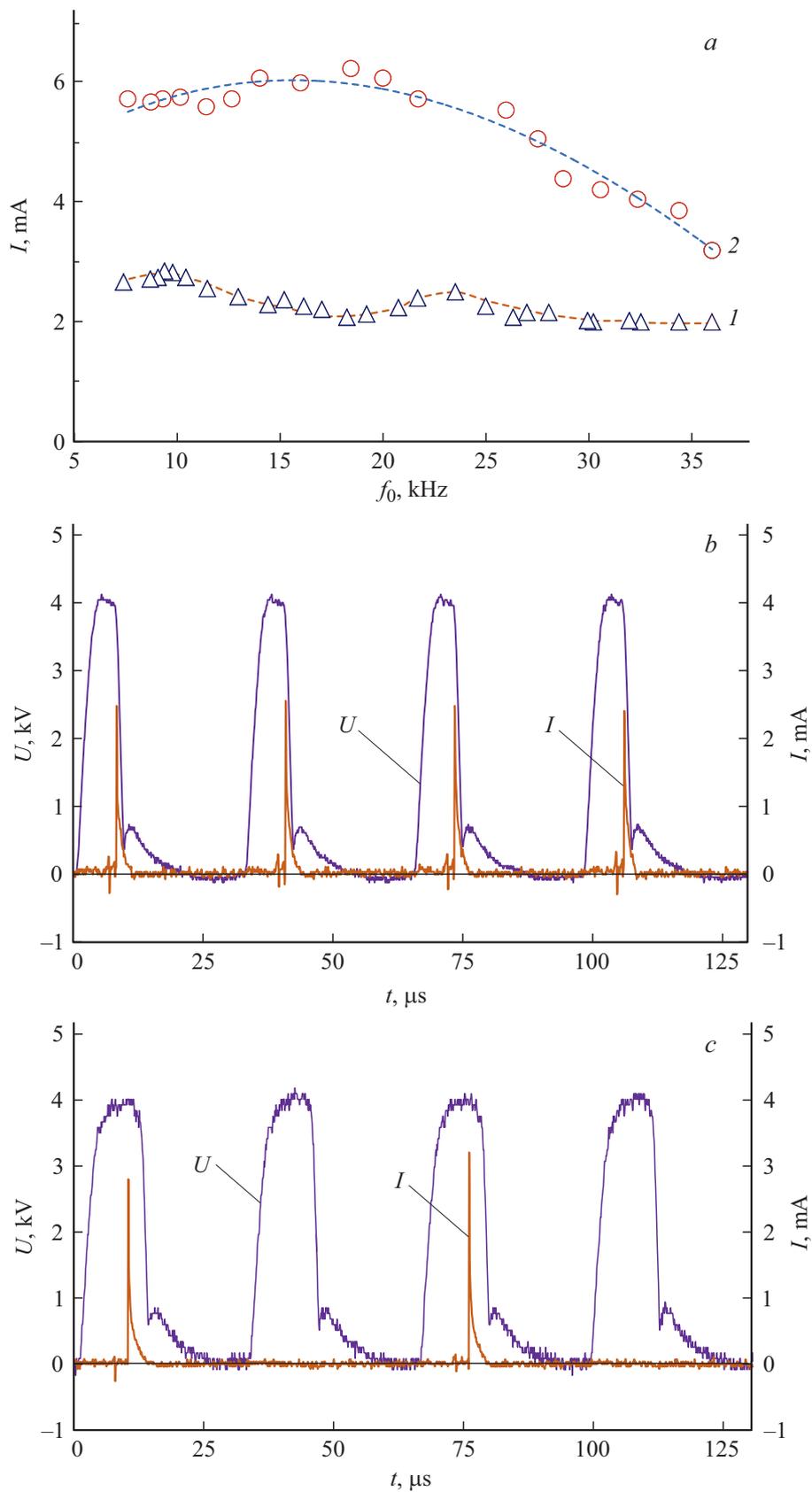


Рис. 3. *a* — зависимости $I(f_0)$ для импульсов с $\tau = 8$ (1) и 16μ s (2). $U = 4.2$ kV, $v = 91$ /min. *b*, *c* — осциллограммы импульсов с длительностями $\tau = 8$ (*b*) и 16μ s (*c*).

возбуждения $\tau = 8$ и $16 \mu\text{s}$ в диапазоне $f_0 = 7\text{--}36 \text{ kHz}$ (рис. 3, *a*). Было обнаружено, что при инициировании ХПС напряжением с „коротким“ импульсом $\tau < 12 \mu\text{s}$ зависимость $I(f)$ монотонно спадает при $f_0 > 15 \text{ kHz}$, при этом во всем исследованном диапазоне f_I (частота импульсов тока, попадающего на подложку) совпадает с частотой следования импульсов напряжения f_0 . Для случая возбуждения ХПС напряжением с „длинными“ импульсами с $\tau > 12 \mu\text{s}$ частота импульсов тока становится меньше частоты следования импульсов напряжения. В диапазоне $f_0 \approx 5\text{--}25 \text{ kHz}$ наблюдается $f_I \approx f_0$, в интервале $f_0 \approx 25\text{--}30 \text{ kHz}$ — неустойчивый режим, при котором $f_I \approx f_0$ или $f_0/2$, а при $f_0 > 30 \text{ kHz}$ — $f_I \approx f_0/2$. При $z \leq 10 \text{ mm}$ $f_I \approx f_0/2$ для любой длительности импульсов.

При варьировании в широком диапазоне экспериментальных условий было установлено, что параметром, влияющим на регулярность характера взаимодействия ХПС с мишенью $I(f_0)$, является длительность импульса τ . Длительности фронта, среза, неравномерность полки импульса и величина отрицательного смещения не влияли на частоту касания тока f_I .

На рис. 3, *b* и *c* приведены осциллограммы, демонстрирующие процесс деления частоты для импульсов с длительностями $\tau = 8$ и $16 \mu\text{s}$ при $U = 4 \text{ kV}$ и фиксированной $f_0 = 30 \text{ kHz}$. Для типичных условий биофизических экспериментов $U \approx 4.2 \text{ kV}$, скорости потока $v = 9 \text{ l/min}$, $z = 25 \text{ mm}$ при $\tau = 8 \mu\text{s}$ частота $f_I = f_0$ (рис. 3, *b*). При $\tau = 16 \mu\text{s}$ частота $f_I = f_0/2$ (рис. 3, *c*). Уменьшение скорости потока при тех же параметрах импульса напряжения приводит к $f_I = f_0$ при $v < 6 \text{ l/min}$, что соответствует результатам работы [5], в которой при $\tau = 20 \mu\text{s}$ и $v \approx 4.5 \text{ l/min}$ во всем исследованном частотном диапазоне $f_I = f_0$.

Таким образом, показано, что достигаемые параметры воздействия ХПС на мишень при импульсном инициировании идентичны таковым при синусоидальном возбуждении. Основным параметром, влияющим на характер взаимодействия ХПС с мишенью $I(f)$, является длительность импульса τ . Это позволяет, управляя его параметрами, обеспечивать регулярный и предсказуемый характер плазменного воздействия на мишени в широком диапазоне частот следования импульсов.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-19-00255) и в рамках государственного задания № 0242-2021-0012.

Соблюдение этических стандартов

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с использованием животных в качестве объектов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Laroussi, S. Bekeschus, M. Keidar, A. Bogaerts, A. Fridman, X. Lu, K. Ostrikov, M. Hori, K. Stapelmann, V. Miller, S. Reuter, Ch. Laux, A. Mesbah, J. Walsh, Ch. Jiang, S. Mededovic Thagard, H. Tanaka, D. Liu, D. Yan, M. Yusupov, IEEE Trans. Rad. Plasma Med. Sci., **6** (2), 127 (2022). DOI: 10.1109/TRPMS.2021.3135118
- [2] J.C. Harley, N. Suchowerska, D.R. McKenzie, Biophys. Rev., **12** (4), 989 (2020). DOI: 10.1007/s12551-020-00743-z
- [3] *Plasma technology for biomedical applications*, ed by E. Martines (MDPI, Basel, 2020).
- [4] I.V. Schweigert, A.L. Alexandrov, D.E. Zakrevsky, Plasma Sources Sci. Technol., **29** (12), 12LT02 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/abc93f
- [5] П.П. Гугин, Д.Э. Закревский, Е.В. Милахина, Письма в ЖТФ, **47** (22), 41 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51726.18977