

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ГЕНЕРАЦИИ И ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В АТМОСФЕРУ В ШИРОКОАПЕРТУРНОМ УСКОРИТЕЛЕ НА ОСНОВЕ ИОННО-ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

© 2023 г. С. Ю. Дорошкевич^{а,*}, М. С. Воробьев^а, М. С. Торба^а, А. А. Гришков^а,
Н. Н. Коваль^а, С. А. Сулакшин^а, В. В. Шугуров^а, В. А. Леванисов^а

^аИнститут сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

*e-mail: doroshkevich096@gmail.com

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.

После доработки 19.09.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Представлен новый способ повышения коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей с несамостоятельным высоковольтным тлеющим разрядом, характеризующийся высокочастотной (десятки кГц) генерацией вспомогательного разряда. Повышение эффективности вывода пучка в атмосферу достигается путем использования импульсного вспомогательного тлеющего разряда орбитронного типа и управления коэффициентом заполнения импульсов этого разряда при стабилизации среднего значения его тока. На примере исследуемого ускорителя показана возможность повышения коэффициента вывода на 0.3 относительно режима с постоянным током.

DOI: 10.31857/S0032816223020052, EDN: UXOCTO

ВВЕДЕНИЕ

Отдельным направлением ускорительной техники является генерация электронных пучков большого сечения (ПБС), которые выводятся в атмосферу через тонкую фольгу [1]. Такие ПБС характеризуются поперечным сечением порядка 1000 см², что обеспечивает высокую производительность при электронно-пучковой обработке различных материалов. Получение ПБС возможно двумя способами: формированием узкого пучка и его разверткой до необходимых размеров с помощью электромагнитной отклоняющей системы (пучки сканирующего типа) [2, 3], а также созданием катода с большой эмитирующей поверхностью, соответствующей размерам генерируемого ПБС [4–6]. Для облучения объектов пучком вне вакуумной камеры используется выводное фольговое окно. Зачастую оно представляет собой многоапертурную пластину с уложенной на нее металлической фольгой, через которую ускоренные электроны выводятся в атмосферу.

Одним из типов ускорителей электронов, позволяющих генерировать ПБС, является ускоритель на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Их принцип действия основан на формировании потока ускоренных ионов, которые бомбардируют поверхность высоковольтного катода,

зачастую представляющего собой металлическую пластину. В результате образуются вторичные электроны, формирующие электронный пучок с энергией, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению. Такие ускорители можно разделить на две группы – с самостоятельным и несамостоятельным ВТР.

Ускорители с самостоятельным ВТР отличаются простотой конструкции, обусловленной возможностью образования плазмы, необходимой для возбуждения ионно-электронной эмиссии, и генерации электронного пучка в одном межэлектродном промежутке без использования дополнительных источников электропитания [7, 8]. Кроме того, данные ускорители способны генерировать многоапертурные электронные пучки различной геометрической формы [9] и иметь электродную систему отличную от плоскопараллельной [10, 11]. Однако ускорители с самостоятельным ВТР зачастую работают в импульсно-периодическом режиме с длительностью импульса, не превышающей нескольких сотен наносекунд, что ограничено переходом ВТР в дуговую форму разряда с резким снижением напряжения на ускоряющем промежутке. Помимо этого, управление током электронного пучка и распределением плотности тока по сечению пучка возможно лишь с помощью изменения давления рабочего газа, повышение которого приводит к со-

крашению высоковольтной стадии генерации разряда.

Более гибкое управление током электронного пучка реализуется в ускорителях с несамостоятельным ВТР, в которых ионный поток для бомбардировки поверхности высоковольтного катода формируется не самим ВТР, а специально созданной анодной плазмой. Данная плазма может быть сгенерирована вспомогательным разрядом различного типа (тлеющий разряд с полым катодом [12], тонкопроволочный разряд орбитронного типа [13], дуговой разряд [14], разряд с термокатодом [15]) либо отдельными ленточными электронными пучками [16, 17]. Для разделения области генерации вспомогательного разряда и ускоряющего промежутка с несамостоятельным ВТР используют металлическую сетку или перфорированный электрод. Это позволяет обеспечить слабую зависимость положения границы анодной плазмы и характеристик вспомогательного разряда от величины ускоряющего напряжения. Таким образом, в ускорителях с несамостоятельным ВТР возможна малоинерционная регулировка тока электронного пучка путем изменения концентрации анодной плазмы и ее распределения при постоянном ускоряющем напряжении. Кроме того, наличие вспомогательного разряда позволяет осуществлять генерацию ВТР при пониженном рабочем давлении (до 10^{-2} Па), тем самым снижая вероятность перехода ВТР в низковольтную форму и обеспечивая возможность генерации непрерывного электронного пучка.

Ускорители на основе ВТР имеют следующие преимущества: относительную простоту конструкции, высокий срок службы катода, возможность управления током пучка без изменения ускоряющего напряжения, умеренные требования к насосной группе, возможность работы в отсутствие нагревательных элементов [18, 19]. Важным преимуществом является возможность расположения элементов ускорителя (кроме высоковольтного катода) под потенциалом “земли”, что значительно упрощает как схему электропитания и управления ускорителя, так и диагностику его систем.

К недостатку ускорителей на основе ВТР можно отнести то, что высокая эффективность вывода тока пучка достигается только при определенной конфигурации электронно-оптической системы и в достаточно узком диапазоне параметров [20]. Данная проблема носит глобальный характер и присуща всем источникам и ускорителям электронов данного типа. Так, например, при изменении ускоряющего напряжения или тока вспомогательного разряда происходит расфокусировка ионного пучка, бомбардирующего катод, что неизбежно приводит к потерям тока электронного пучка на ребрах анодной решетки и опорной ре-

шетки выпускного фольгового окна и, как следствие, к снижению энергетической эффективности ускорителя. Именно поэтому цель данной работы состояла в определении нового энергоэффективного способа генерации электронного пучка в ускорителе электронов на основе несамостоятельного ВТР при переходе к высокочастотному режиму генерации вспомогательного разряда.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследуемый широкоапертурный ускоритель на основе несамостоятельного ВТР позволяет генерировать и выводить в атмосферу непрерывный электронный пучок сечением 650×450 мм², энергией 150 кэВ и током до 30 мА [21]. Конструкция ускорителя (рис. 1) имеет два основных промежутка: дрейфовый промежуток 1, в котором горит вспомогательный разряд, генерирующий эмиссионную плазму и формирующий плазменный анод, и ускоряющий промежуток (область горения несамостоятельного ВТР) 2, в котором заряженные частицы приобретают высокую энергию, соответствующую ускоряющему напряжению. Промежутки разделены анодной решеткой 5 с отверстиями щелевого типа. Конфигурация отверстий в анодной решетке повторяет конфигурацию отверстий в водоохлаждаемой опорной решетке выводного окна, перекрытого алюминий-магниевого фольгой марки АМг-2н толщиной 30 мкм. Роль вспомогательного разряда выполняет самостоятельный тлеющий разряд с полым катодом и двумя тонкопроволочными анодами [22, 23]. В качестве полого катода используются стенки вакуумной камеры 7 (площадью $\approx 21\,000$ см²), а анодом служат две вольфрамовые проволоки 4 диаметром 0.035 см и длиной 85 см (суммарной площадью ≈ 18 см²), натянутые вдоль длинной стороны выводного окна и находящиеся в геометрической тени для электронного пучка. Рабочий газ гелий напускается в область горения вспомогательного разряда, рабочее давление составляет 1–5 Па. Ионы, эмитированные с границы анодной/эмиссионной плазмы и прошедшие через отверстия анодной решетки, набирают энергию в ускоряющем промежутке и бомбардируют поверхность высоковольтного катода, находящегося под потенциалом до -150 кВ относительно “земли”, что приводит к вторичной ионно-электронной эмиссии. Часть ионов нейтрализуется в высоковольтном зазоре, и бомбардировка катода в этом случае осуществляется нейтралами, имеющими широкий энергетический спектр [24]. В результате такой бомбардировки возникают вторичные электроны, которые ускоряются по направлению к анодной решетке, дрейфуют через плазму вспомогательного разряда и, проходя через каналы выводного фольгового окна, выводятся в атмосферу.

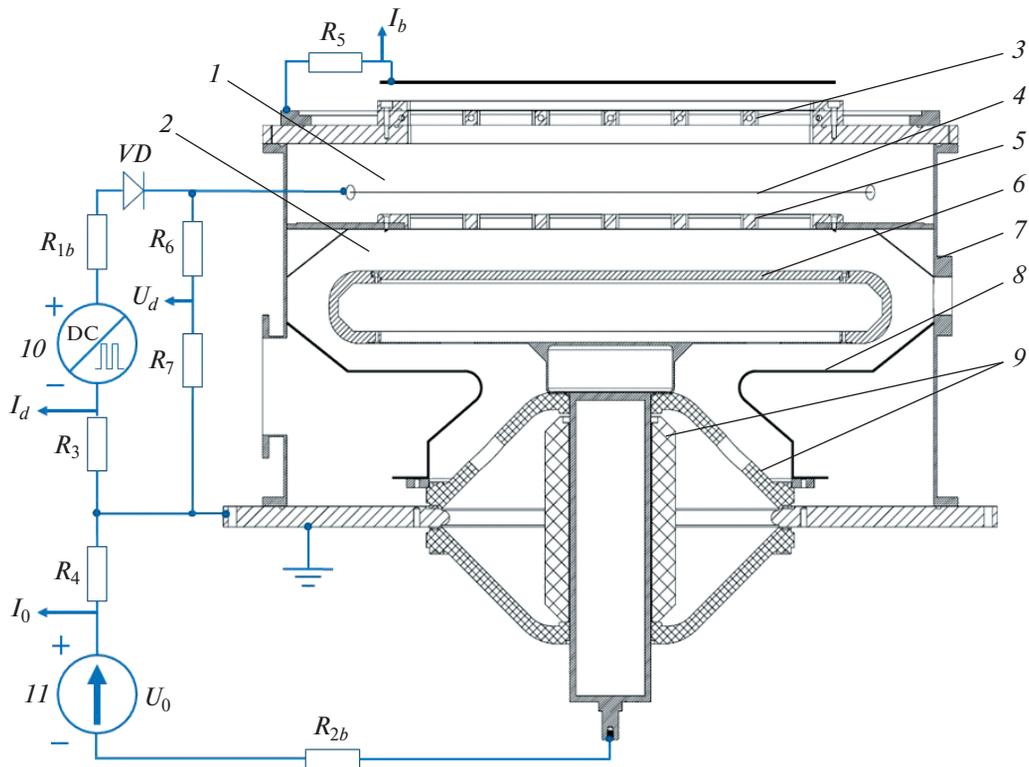


Рис. 1. Схема ускорителя электронов с несамостоятельным ВТР. 1 – дрейфовый промежуток; 2 – ускоряющий промежуток; 3 – выводное фольговое окно; 4 – тонкопроволочный анод; 5 – анодная решетка; 6 – высоковольтный катод; 7 – вакуумная камера; 8 – экран; 9 – изоляторы; 10 – источник питания вспомогательного разряда; 11 – высоковольтный источник питания.

Генерация вспомогательного разряда осуществляется с помощью источника электропитания, который способен работать как в постоянном (direct current – DC), так и в импульсном режиме с частотой 1–100 кГц со стабилизацией среднего значения тока. Импульсный режим генерации вспомогательного разряда позволяет обеспечить большую амплитуду тока вспомогательного разряда и концентрацию эмиссионной плазмы за счет изменения коэффициента заполнения импульсов. Ранее подобная регулировка, но в более низкочастотном режиме была продемонстрирована при использовании источника электронов с сеточным плазменным катодом [25]. Изменение частоты следования импульсов при этом позволяет управлять длительностью импульса тока разряда и паузой между импульсами, которая для рассматриваемой высокочастотной генерации разряда находится в диапазоне 5–800 мкс.

Для тлеющего разряда орбитронного типа характерно значительное превышение площади катода S_c над площадью анода S_a ($S_a \ll S_c$), что обеспечивает осцилляции электронов внутри вакуумного объема и эффективную ионизацию рабочего газа электронным ударом [22, 26]. При этом площадь анода S_a должна быть достаточной для отве-

дения тепловой нагрузки, определяемой плотностью электронного тока в соответствии с отношением масс электрона m_e и иона рабочего газа M_i : $(m_e/M_i)^{1/2}$ [27, 28]. В нашем случае $S_a/S_c \approx 8 \cdot 10^{-4}$, что отличается более чем на порядок от отношения масс для атомарного гелия $(m_e/M_i)^{1/2} \approx 11 \cdot 10^{-3}$. Важно отметить, что импульсный режим генерации вспомогательного разряда позволяет снизить тепловую нагрузку на тонкопроволочные аноды с возможностью достижения большей амплитуды тока разряда, в отличие от постоянного режима генерации, в котором зачастую наблюдается перегрев и выход из строя анодных проволочек при величине тока разряда более нескольких сотен миллиампер. Кроме того, генерация разряда с частотой в десятки килогерц способствует снижению вероятности образования катодных пятен на стенках полого катода вспомогательного разряда [29], что связано с компенсацией заряда, накопленного на поверхности диэлектрических пленок, в момент паузы генерации разряда [30].

Характерные осциллограммы и вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда в импульсном режиме генерации для разных значений коэффициента заполнения импульсов D при стабилизации среднего тока представлены на рис. 2 и 3 со-

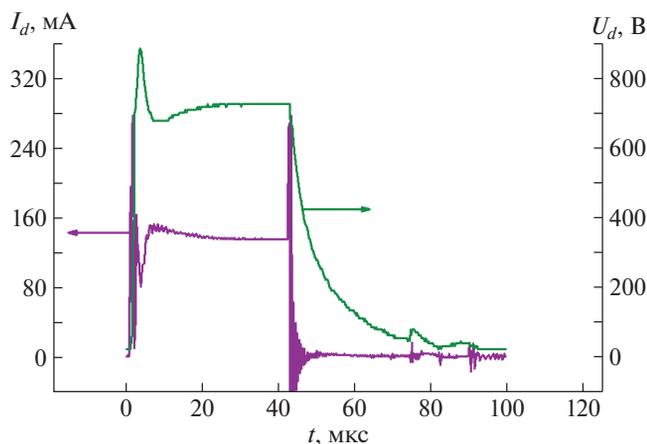


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения вспомогательного разряда при $f = 10$ кГц, $D = 40\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па, $I_{dcp} = 55$ мА.

ответственно. Наибольшее напряжение разряда соответствует наименьшему D за счет большей амплитуды тока разряда и растущей ВАХ. Поэтому напряжение разряда в DC-режиме ($D = 100\%$) всегда меньше, чем в импульсном режиме, при одинаковом среднем токе разряда. Амплитудное значение тока разряда на одном проволочном аноде определяется как:

$$I_m = \frac{I_{dcp}}{2D}, \quad (1)$$

где I_m — амплитудное значение тока; D — коэффициент заполнения импульса; I_{dcp} — среднее за период значение тока разряда с двух проволочных анодов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ток электронного пучка, выведенного в атмосферу, регистрировался коллектором, представляющим собой пластину из нержавеющей стали, полностью перекрывающую выводное окно ускорителя и расположенную на расстоянии 20 мм от выводной фольги. На резисторе $R_5 = 100$ Ом (см. рис. 1) измерялась разность потенциалов, создаваемая током пучка, относительно корпуса ускорителя. Для сравнения эффективности вывода электронного пучка из вакуума в атмосферу в разных режимах генерации вспомогательного разряда использовался параметр — коэффициент вывода электронного пучка, рассчитываемый как отношение тока пучка, выведенного в атмосферу, к общему току в ускоряющем промежутке: $\beta = I_b/I_0$. В DC-режиме коэффициент вывода слабо зависел от величины тока вспомогательного разряда в исследуемом диапазоне (рис. 4) и составлял менее 0.25 при ускоряющем напряжении 140 кВ [31]. Осциллограммы токов ускорителя в DC-режиме

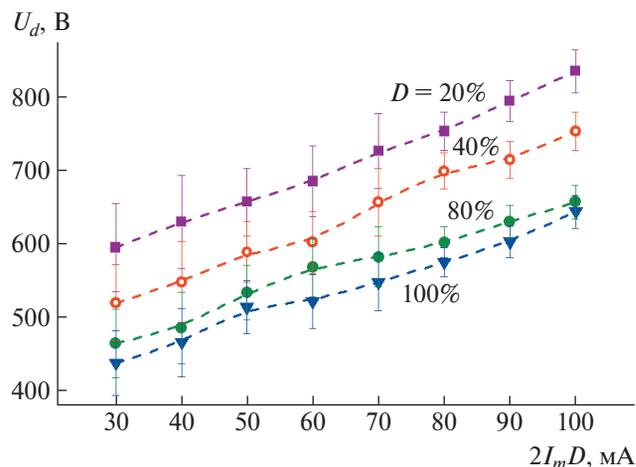


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики вспомогательного разряда при разных значениях коэффициента заполнения импульсов D ($p(\text{He}) = 3$ Па, $f = 20$ кГц).

вспомогательного разряда при ступенчатом изменении ускоряющего напряжения от 50 до 150 кВ приведены на рис. 5.

Слабая зависимость коэффициента β от тока вспомогательного разряда в постоянном режиме генерации, вероятно, связана со слабым изменением положения границы анодной плазмы и ионно-электронной оптической системы (ИЭОС) в диапазоне токов 30–80 мА. Низкое значение β (< 0.25) свидетельствует о значительных потерях тока пучка внутри электродной системы ускорителя. Потери электронного пучка складываются из потерь на анодной и выводной решетках, а также потерь внутри алюминий-магниевой выводной фольги [20].

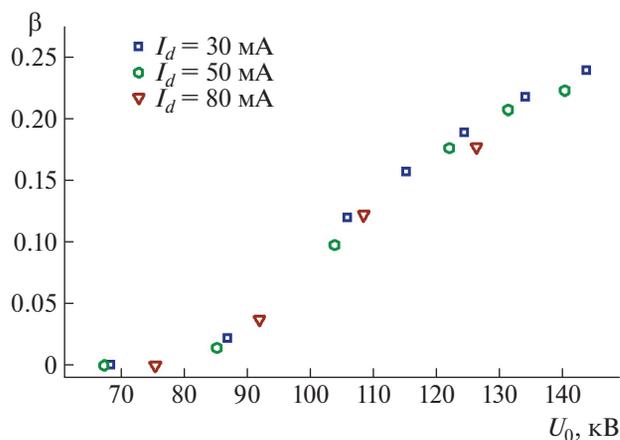


Рис. 4. Зависимости коэффициента вывода тока пучка β в атмосферу от ускоряющего напряжения в DC-режиме при разных значениях тока вспомогательного разряда ($p(\text{He}) = 4.5$ Па).

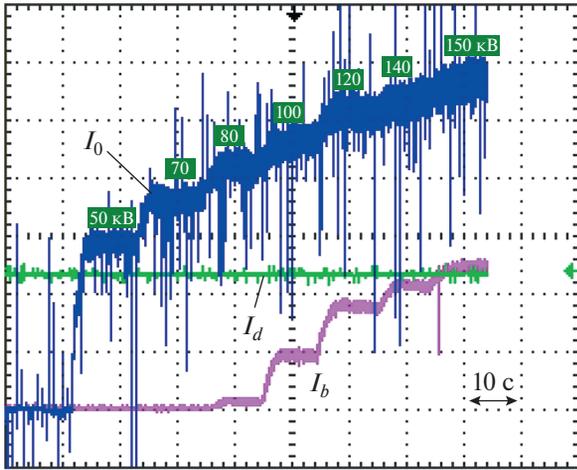


Рис. 5. Осциллограммы токов в DC-режиме при разном ускоряющем напряжении (50, 70, 80, 100, 120, 140, 150 кВ). I_0 – ток в ускоряющем промежутке (10 мА/деление), I_d – ток вспомогательного разряда (20 мА/деление), I_b – ток пучка (5 мА/деление).

Осциллограммы токов ускорителя при генерации вспомогательного разряда в импульсном режиме приведены на рис. 6. Коэффициент вывода в этом случае определялся в момент окончания импульса тока вспомогательного разряда. Согласно рис. 7, коэффициент β при $D = 80\%$ близок по значениям к режиму постоянного тока. Уменьшение коэффициента D приводит к росту β : при $D = 20\%$, $U_0 = 150$ кВ коэффициент вывода $\beta > 0.5$. При уменьшении коэффициента заполнения D соответственно увеличиваются ток и напряжение горения разряда, а следовательно, повышается концентрация эмиссионной плазмы и изменяется ширина прикатодного слоя:

$$d_k = \epsilon_0^{1/2} \left(\frac{1}{ekT_e} \right)^{1/4} \frac{U_k^{3/4}}{n_i^{1/2}}. \quad (2)$$

Повышение напряжения горения разряда может приводить к росту прикатодного потенциала, в результате чего эмитированные из анодной плазмы ионы поступают в ускоряющий промежуток с большей энергией, изменяя ИЭОС таким образом, что коэффициент вывода пучка в атмосферу растёт.

Максимальный коэффициент вывода электронного пучка при определенной энергии задается, прежде всего, толщиной и материалом выводной фольги. В нашем случае использовалась алюминий-магниевая фольга толщиной 30 мкм. В работах [32, 33] представлены данные по коэффициентам прохождения электронами алюминиевой фольги разной толщины (см. рис. 7). Из приведенных данных видно, что максимальный коэффициент вывода β при 150 кВ составляет ≈ 0.85 , в то время как в DC-режиме достигнут β , равный

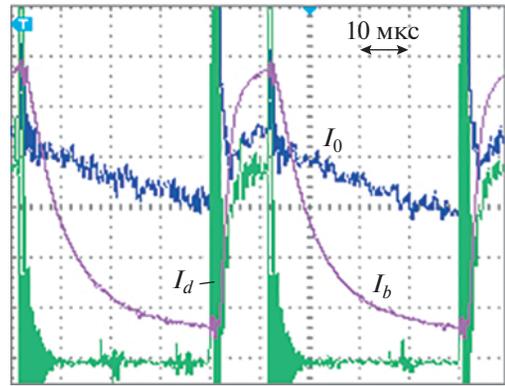


Рис. 6. Осциллограммы токов в импульсном режиме ($U_0 = 146$ кВ, $I_{dcp} = 30$ мА, $f = 20$ кГц, $D = 20\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па). I_0 – ток в ускоряющем промежутке (5 мА/деление); I_d – ток разряда (20 мА/деление); I_b – ток пучка (2 мА/деление).

0.25, а при переходе в импульсный режим максимальное значение β составило 0.57 при $D = 20\%$. В нашем случае коэффициент β включает в себя еще ионный компонент тока в ускоряющем промежутке. При коэффициенте ионно-электронной эмиссии γ около 10 [24] доля ионного тока в ускоряющем промежутке составляет $\approx 10\%$, а значит, реальный коэффициент вывода электронного пучка β_e в импульсном режиме генерации достигает значения: $\beta_e = I_b / (0.9I_0) = 0.63$. Таким образом, даже в этом случае имеется более 20% потеря тока пучка на ребрах анодной и опорной решеток.

Кроме того, согласно осциллограммам (см. рис. 6), после окончания генерации вспомога-

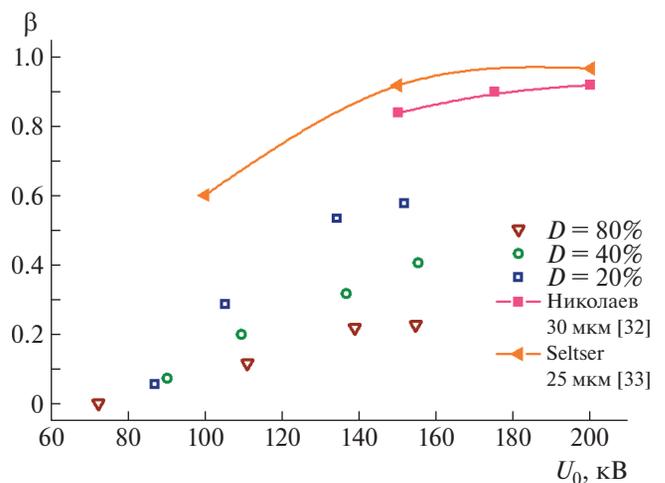


Рис. 7. Зависимости коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в импульсном режиме при разном коэффициенте заполнения D . $p(\text{He}) = 3$ Па, $I_{dcp} = 30$ мА, $f = 10$ кГц.

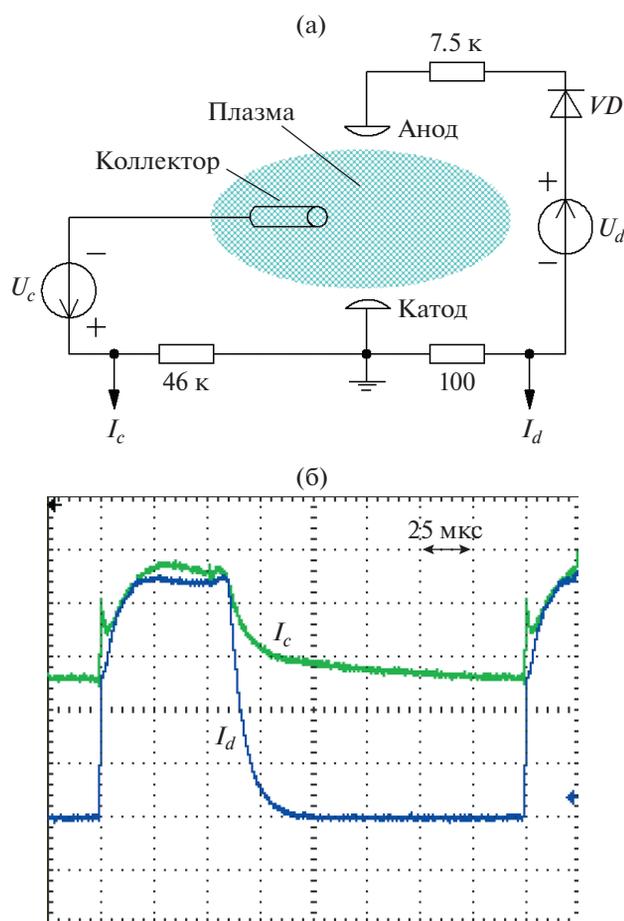


Рис. 8. а – схема подключения цилиндрического коллектора; б – осциллограммы тока вспомогательного разряда I_d (50 мА/деление) и тока на цилиндрическом коллекторе I_c (0.2 мА/деление). $I_{dcp} = 65$ мА, $f = 5$ кГц, $D = 30\%$, $p(\text{He}) = 4.5$ Па.

тельного разряда начинается спад тока пучка I_b , выведенного в атмосферу, и за время паузы он становится близким к нулю. При этом ток в ускоряющем промежутке I_0 после прекращения генерации вспомогательного разряда I_d спадает с меньшей скоростью и во время паузы остается значительным. Таким образом, в момент паузы генерации вспомогательного разряда коэффициент β стремится к нулю.

Наличие тока в ускоряющем промежутке в паузу генерации вспомогательного разряда можно объяснить релаксационными процессами в анодной плазме после прекращения импульса тока разряда. Для проверки данного предположения внутри вакуумной камеры был помещен цилиндрический коллектор площадью ≈ 130 см², на который в отсутствие ускоряющего напряжения подавалось постоянное отрицательное напряжение смещения относительно полого катода для измерения тока ионов из плазмы вспомогательного

тлеющего разряда (рис. 8а). Согласно рис. 8б, после окончания импульса разряда I_d ток коллектора I_c спадает, но за время паузы ≈ 130 мкс не достигает нуля, а остается на уровне 100 мкА. Это позволяет сделать вывод, что время релаксации плазмы вспомогательного разряда существенно превышает время паузы между импульсами тока разряда. В результате во время паузы между импульсами тока разряда в ускоряющий промежуток продолжают поступать ионы из плазменного анода, поддерживающие горение ВТР.

По результатам анализа проведенных экспериментов была также построена зависимость коэффициента вывода β электронного пучка от ускоряющего напряжения U_0 при варьировании частоты генерации f вспомогательного разряда (рис. 9). Согласно рис. 9, наибольшее значение коэффициента β достигается при генерации импульсов вспомогательного разряда с частотой $f = 10\text{--}30$ кГц. С повышением частоты генерации разряда от 10 до 70 кГц ток пучка в атмосфере изменяется незначительно, однако ток в ускоряющем промежутке при $f > 30$ кГц возрастает, что в итоге приводит к соответствующему снижению коэффициента β . Важно отметить, что напряжение горения разряда U_d с ростом частоты следования импульсов изменяется незначительно. Так, при повышении частоты f от 1 до 70 кГц напряжение U_d (рис. 10), которое фиксировалось в конце импульса при одинаковой величине тока 140 мА, изменяется менее чем на 50 В и составляет $U_d = 700 \text{ В} \pm 3\%$. Тем не менее, зависимость $\beta(f)$ может быть также обусловлена динамикой прикладного падения потенциала в полом катоде, которая, в свою очередь, может способствовать фокусировке или расфокусировке ионного потока в области ускоряющего промежутка. Для проверки данной гипотезы необходимо провести зондовые измерения параметров эмиссионной плазмы и последующее математическое моделирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что генерация вспомогательного тлеющего разряда в импульсном режиме с частотой десятки килогерц позволяет повысить коэффициент вывода тока пучка в атмосферу ускорителей на основе ионно-электронной эмиссии. Так, на исследуемом ускорителе показано, что при ускоряющем напряжении 150 кВ в DC-режиме коэффициент вывода электронного пучка не превышает 0.25. Переход к импульсному режиму генерации вспомогательного разряда позволяет увеличить коэффициент вывода на 0.3 в момент максимума тока в ускоряющем промежутке. По-видимому, увеличение тока и напряжения горения разряда, а следовательно, повышение концентрации эмиссионной

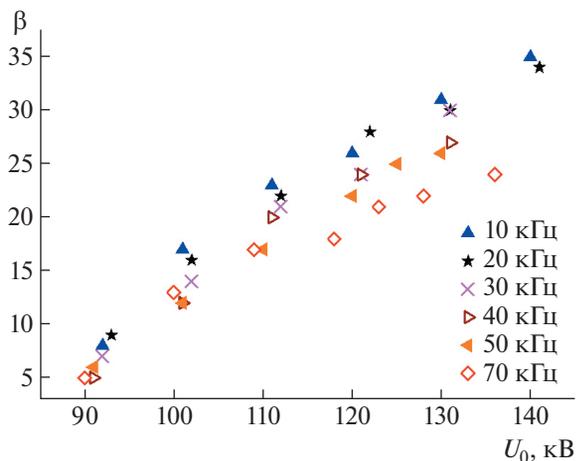


Рис. 9. Зависимости коэффициента вывода тока пучка в атмосферу от ускоряющего напряжения в импульсном режиме при разной частоте генерации ($I_d = 50$ мА, $D = 30\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па).

плазмы, уменьшение ширины прикатодного слоя и рост прикатодного падения потенциала вспомогательного разряда, вызванные снижением коэффициента заполнения D и соответствующим ростом амплитуды тока разряда, приводят к снижению потерь на анодной и опорной решетках и формированию более оптимальной ИОЭС. Однако в паузу генерации вспомогательного разряда спад тока пучка в атмосфере происходит быстрее чем спад тока в ускоряющем промежутке, что приводит к резкому уменьшению коэффициента вывода: $\beta < 0.05$. Такой рост потерь тока пучка в момент паузы между импульсами тока разряда можно объяснить релаксационными процессами плазмы вспомогательного разряда, уменьшением энергии и доли ионов, поступающих в ускоряющий промежуток, а следовательно, изменением ИОЭС и/или релаксационными процессами плазмы ВТР, что является предметом дальнейших исследований. Сокращение паузы между импульсами путем повышения частоты генерации вспомогательного разряда с 10 до 70 кГц приводит к снижению максимального коэффициента вывода β на ≈ 0.1 , но при этом в момент паузы генерации β может составлять ~ 0.15 .

Даже при условии, что интегральная эффективность вывода пучка в атмосферу остается неизменной при переходе от постоянного к импульсному режиму генерации вспомогательного разряда, можно однозначно заключить о целесообразности использования предлагаемого подхода как для повышения стабильности генерации электронного пучка (уменьшения количества пробоев, обусловленных снижением вероятности образования катодных пятен на стенках полого катода вспомогательного разряда), так и для дальнейших использований оборудования такого

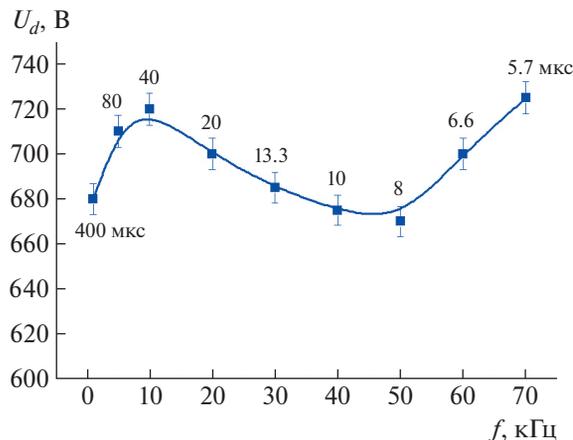


Рис. 10. Зависимость напряжения вспомогательного разряда от частоты его генерации ($I_d = 55$ мА, $D = 40\%$, $p(\text{He}) = 3$ Па). Цифры у кривой – время, соответствующее длительности импульса разряда для конкретной частоты.

класса с возможностью достижения более высокой импульсной плотности мощности пучка, что может быть крайне важно при решении многих радиационных задач при облучении различных органических материалов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Salimov R.A., Cherepkov V.G., Golubenko J.I., Krainov G.S., Korabelnikov B.M., Kuznetsov S.A., Kuksanov N.K., Malinin A.B., Nemytov P.I., Petrov S.E., Prudnikov V.V., Fadeev S.N., Veis M.E. // Radiation Physics and Chemistry. 2000. V. 57. P. 661. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00486-7](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00486-7)
3. Брызгин А.А., Безуглов В.И., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Кузнецов Г.И., Макаров И.Г., Острейко Г.Н., Панфилов А.Д., Радченко В.М., Сердобинцев Г.В., Сидоров А.В., Тарнецкий В.В., Тиунов М.А., Факторович Б.Л., Чернов К.Н., Ческидов В.Г. // ПТЭ. 2011. № 3. С. 5.
4. Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Сулакшин С.А. // ПТЭ. 2015. № 5. С. 112. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040138>
5. Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косоголов С.Л., Кузьмин В.Н., Сень В.И., Ткаченко Д.Ю., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2013. № 1. С. 81. <https://doi.org/10.7868/S0032816213010047>

6. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий. Екатеринбург: Уральский ГАУ, 2017.
7. Crocker A., Foster H., Rampson H.M., Holliday J.H. // *Electronics Lett.* 1972. V. 8. № 18. P. 460.
8. O'Brien B.V. // *Applied Physics Letters.* 1973. V. 22. Iss. 10. P. 503.
<https://doi.org/10.1063/1.1654485>
9. Вагнер И.В., Болгов Э.И., Гракун В.Ф., Гохфельд В.Л., Кудлай В.А. // *ЖТФ.* 1974. Т. 44. № 8. С. 1669.
10. Garnsworthy R.K., Mathias L.E.S., Carmichael C.H.H. // *Applied physics letters.* 1971. V. 19. № 12. P. 506.
11. Балтаков Ф.Н., Босамыкин В.С., Корнилов В.Г., Кудрявкин Е.В., Павловский А.И., Селявский В.Т., Суханов Л.В., Челпанов В.И. // *ЖТФ.* 1976. Т. 46. № 10. С. 2195.
12. Isaacs G.G., Jordan D.L., Dooley P.J. // *J. Phys. E.: Sci. Instrum.* 1979. V. 12. P. 115.
13. Dior V., Bonnet J., Schmid T., Mohamed A. // *Sensors.* 2011. V. 11. № 5. P. 5202.
<https://doi.org/10.3390/s110505202>
14. Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. // *ЖТФ.* 1985. Т. 55. № 9. С. 1886.
15. Нечаев А.А., Персианцев И.Г., Полушкин В.М., Тимофеев М.А., Тугарев В.А. // *ПТЭ.* 1983. № 2. С. 156.
16. Денисов С.С., Успенский Н.А., Федяков В.П. // *ПТЭ.* 1984. № 2. С. 139.
17. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. // *ПТЭ.* 1984. № 4. С. 24.
18. Косогооров С.Л., Успенский Н.А., Шведюк В.Я., Васеленок А.А., Джигайло И.Д., Смирнов Г.А. // *Известия вузов. Физика.* 2020. Т. 63. № 10. С. 41.
19. Баранов Г.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косогооров С.Л., Кузьмин В.Н., Немчинов В.С., Сень В.И., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // *ПТЭ.* 2020. № 2. С. 102.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220030027>
20. Аброян М.А., Евстратов И.Ю., Косогооров С.Л., Мотовилов С.А., Сиротинкин В.В., Шаниро В.Б. // *ПТЭ.* 1998. № 2. С. 83.
21. Doroshkevich S., Sulakshin S., Vorobyov M., Koval N., Ekavyan A., Chistyakov A. // *IEEE 2020. Proc. of 7th Int. Cong. on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). 21st Int. Symp. on High-Current Electronics (Toms).* 2020. P. 42.
<https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9241926>
22. McClure G. // *Appl. Phys. Lett.* 1963. V. 2. № 12. P. 233.
<https://doi.org/10.1063/1.1753749>
23. Makarov M., Loumani Y., Minea T., Gousset G., Kozyrev A. // *Europhys. Lett.* 2006. V. 74. № 3. P. 431.
<https://doi.org/10.1209/epl/i2005-10542-y>
24. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. М.: Энергоатомиздат, 1983.
25. Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Месяц Г.А., Шведов Ф.Н. // *ПЖТФ.* 1988. Т. 14. № 10. С. 865.
26. Никулин С.П. // *ЖТФ.* 1997. Т. 67. № 5. С. 43.
27. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
28. Метель А.С., Григорьев С.Н., Мельник Ю.А., Панин В.В. // *Физика плазмы.* 2009. Т. 35. № 12. С. 1140.
29. Torba M.S., Doroshkevich S.Yu., Levanisov V.A., Vorobyov M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A. // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. V. 2064. 012122.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012122>
30. Belkind A., Freilich A., Scholl R. // *Surface and Coatings Technology.* 1998. V. 108–109. P. 558.
31. Doroshkevich S.Yu., Vorobyov M.S., Torba M.S., Koval N.N., Sulakshin S.A., Levanisov V.A., Ekavyan A.A., Chistyakov A.V. // *Journal of Physics: Conference Series.* 2021. V. 2064. 012116.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012116>
32. Николаев В.Б. // *ЖТФ.* 1976. № 7. С. 1555.
33. Seltser S.M., Berger M.J. // *Nucl. Instrum. and Methods.* 1974. V. 119. P. 157.