

04.1

## Вольт-амперные характеристики и эффективность генерации электронного пучка в высоковольтном аномальном тлеющем разряде

© П.А. Бохан<sup>1</sup>, П.П. Гугин<sup>1</sup>, Д.Э. Закревский<sup>1,2</sup>, Г.В. Шевченко<sup>1,3</sup><sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: shevchenko@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 1 июля 2024 г.

В окончательной редакции 12 июля 2024 г.

Принято к публикации 12 июля 2024 г.

Проведены исследования вольт-амперных характеристик и эффективности генерации электронного пучка в высоковольтном аномальном тлеющем разряде в режиме постоянного тока в гелии при давлении 2.17–10.2 Torr в условиях минимизации контролируемых и неконтролируемых примесей рабочей среды. Продемонстрирован немонотонно возрастающий характер вольт-амперных характеристик и получены эффективности генерации электронного пучка ~ 80%.

**Ключевые слова:** газовый разряд, гелий, электронный пучок, эффективность.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59126.20045

Высоковольтные аномальные тлеющие разряды (АТР) длительное время используются как источники электронных пучков (ЭП), не требующие дифференциальной откачки [1–8]. Ускорение электронов происходит в области объемного заряда у катода — катодного падения потенциала, к которому приложено практически все разрядное напряжение, что предопределяет преобладание монокинетической составляющей функции распределения электронов. Несмотря на многолетние исследования, АТР продолжает привлекать к себе внимание, с одной стороны, простотой достижимости требуемых параметров, а с другой — в связи с появлением оригинальных, ранее неизвестных свойств. В работе [4] показано, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) АТР в значительной степени зависят от реализации экспериментальных условий. При тщательном обезгаживании разрядного объема и кондиционировании катода ВАХ приобретают S-образный вид (в координатах  $U-I$ ). В свою очередь введение молекулярных примесей приводит к тому, что ВАХ становятся монотонно возрастающими. Присутствие молекулярных примесей (контролируемых и, особенно, неконтролируемых) в газовой среде способствует изменению роли, состава и энергии бомбардирующих холодный катод частиц. При условии зависимости эмиссионных свойств катода от модификации эмитирующего слоя за счет имплантации в поверхность рабочих частиц функциональные параметры АТР (разрядное напряжение и ток, эффективность генерации электронного пучка, характер протекания тока) будут определяться чистотой рабочей среды и состоянием эмитирующей поверхности.

Целью настоящей работы является исследование ВАХ и эффективности генерации электронного пучка в ано-

мальном тлеющем разряде в гелии в режиме постоянного тока при повышенных (более 1 kV) напряжениях в „физически чистых“ условиях, т.е. в условиях минимизации контролируемых и неконтролируемых примесей рабочей среды и материала катода.

Для исследования разряда использовалась ячейка с плоскими полированными электродами: катодом из реакционно-спеченного карбида кремния и медным анодом с межэлектродным расстоянием  $d_{ca} = 3$  см. Электроды разделены стеклянным цилиндром и многослойным изолятором из керамических пластин  $Al_2O_3$  с внутренним диаметром отверстий 1.6 и 2.3 см, которые ограничивают площадь разряда до  $2$  см<sup>2</sup>. Для обезгаживания разрядного объема на ячейке монтировался нагреватель, а катод устанавливался через изолирующую керамическую пластину на алюминиевой подставке с отдельным нагревателем. Непосредственно в экспериментах подставка выступала в роли радиатора, что в совокупности с кулером позволяло не превышать температуру разрядного объема  $T \leq 50^\circ C$  и сохранять возможность стабильной работы до вкладываемой в разряд мощности  $P = UI = 60$  W ( $U$ ,  $I$  — напряжение и ток разряда соответственно). Использовался источник постоянного тока с регулируемым напряжением  $U = 0-5$  kV и балластным сопротивлением  $R = 20-600$  k $\Omega$ .

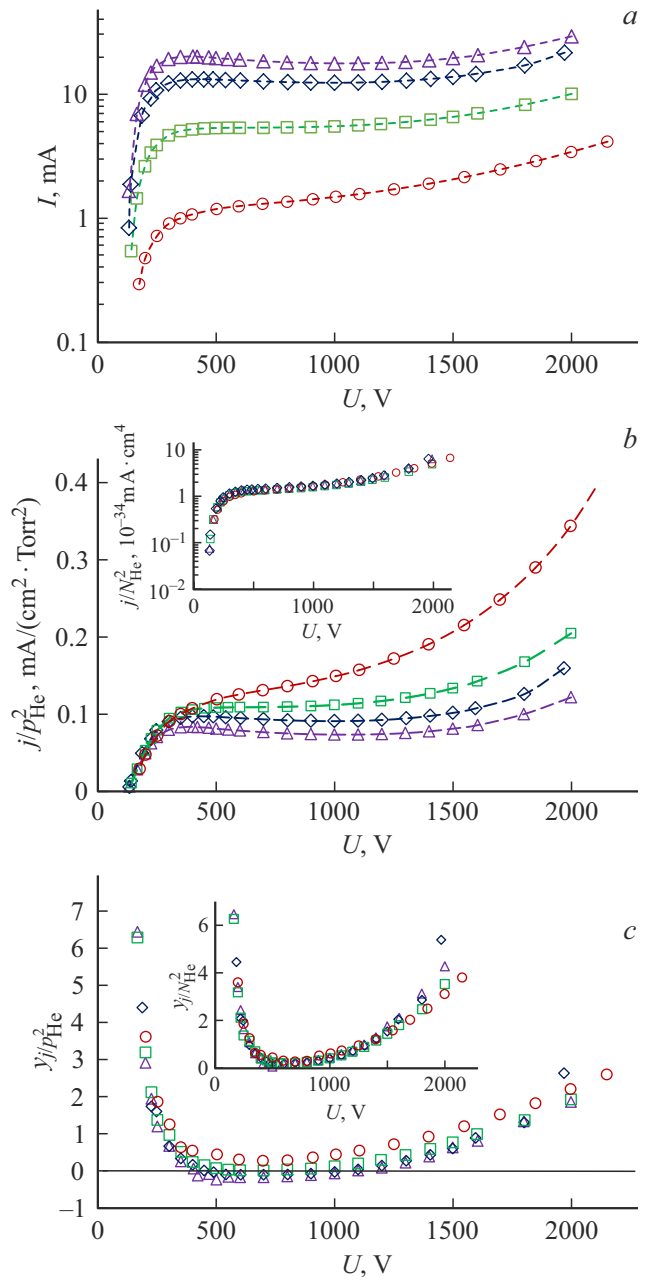
Эксперименты проводились в гелии с объемной долей не менее 99.9999%, который подавался в ячейку со скоростью 100–150 ml/min через охлаждаемую жидким азотом угольную ловушку. Чистота рабочего газа оценивалась по отношению светимостей молекулярных полос водорода, азота и кислорода. Давление гелия измерялось при помощи емкостного датчика Thyracont VCC200MA4 с точностью  $\pm 0.25\%$ .

Перед каждым циклом измерений параметров разряда проводилось обезгаживание ячейки. Процедура заключалась в том, что ячейка нагревалась до  $T = 100^\circ\text{C}$  и откачивалась турбомолекулярным насосом до давления менее  $10^{-6}$  Торр. В дальнейшем проводилась тренировка катода разрядом, состоявшая в итерационном повышении напряжения каждые 5 min от 200 V до рабочего с шагом в 50–100 V с откачкой разрядного объема после каждой итерации. После этих манипуляций фактическое натекание вакуумной системы и разрядной ячейки составляло  $\sim 10^{-6}$  Торр/ч, что на два порядка меньше, чем было достигнуто ранее в работе [4].

Измерение энергетической эффективности генерации электронного пучка  $\eta$  осуществлялось калориметрическим методом. Под энергетической эффективностью понимаются доли энергии  $\eta_{ds}(\eta_{col}) = P_{ds}(P_{col})/P$ , где  $P_{ds}$  — мощность, теряемая в разрядном промежутке,  $P_{col}$  — мощность, рассеиваемая на аноде — коллекторе электронов. Общая эффективность генерации разрядом электронного пучка  $\eta = \eta_{ds} + \eta_{col}$ . Методика определения  $\eta_{ds}$  и  $\eta_{col}$  заключалась в следующем. Предварительно измерялись калибровочные зависимости изменения температуры  $\Delta T$  на стенке и аноде ячейки от мощности на встроенных нагревателях в отсутствие разряда. Из сопоставления измеренных значений температуры на стенке ячейки и анода при функционировании разряда с известными калибровочными кривыми могут быть получены соответствующие мощности  $P_{ds}$ ,  $P_{col}$  и вычислены значения  $\eta_{ds}$ ,  $\eta_{col}$  и  $\eta$ .

На рис. 1, а в качестве примера представлено семейство вольт-амперных характеристик АТР в координатах  $I-U$  при давлении гелия  $p_{\text{He}} = 2.17, 4.67, 7.67$  и 10.2 Торр. Режим функционирования АТР со стабильно воспроизводимыми ВАХ достигался после  $\sim 50$  h тренировки катода и обезгаживания ячейки. Из рисунка видно, что с ростом давления зависимости  $I(U)$  изменяют свой характер и при  $p_{\text{He}} \geq 5$  Торр перестают быть монотонно возрастающими. Присутствуют участки уменьшения тока с ростом напряжения, причем максимальная величина уменьшения наблюдается при наибольшем исследованном давлении газа. При  $p_{\text{He}} = 10.2$  Торр максимум тока достигается при  $U \approx 400$  V. С повышением напряжения до  $U \approx 1100$  V разрядный ток уменьшается и при дальнейшем увеличении  $U$  начинается новый рост  $I$ . Подобное поведение ВАХ свидетельствует об изменении типа разряда — переходе от нормального разряда к аномальному и затем к разряду с убегающими электронами и формированию разряда, контролируемого фотоэмиссией [4,5].

Согласно данным более ранних работ [6–8], высоковольтные разряды, в которых генерируются электронные пучки килоэлектронвольтных энергий на основе эффекта убегающих электронов, имеют ВАХ вида  $j \sim p^x U_c^y$  (где  $j$  — плотность тока,  $U_c$  — катодное падение потенциала, которое в условиях высоких значений  $U_c$  практически равно приложенному к разрядному промежутку напряжению  $U$ ) с показателями степени, например,  $x = 2$ ,



**Рис. 1.** Семейство вольт-амперных характеристик АТР в координатах  $I-U$  (а), зависимости  $j/p_{\text{He}}^2(U)$  (на вставке —  $j/N_{\text{He}}^2(U)$ ) (б) и  $y_{j/p_{\text{He}}^2}(U)$  (на вставке —  $y_{j/N_{\text{He}}^2}(U)$ ) (с).  $p_{\text{He}}$ , Торр: кружки — 2.17, квадраты — 4.67, ромбы — 7.67, треугольники — 10.2.

$y = 3$  в работе [6];  $x = -1.5$ ,  $y = 2.5$  в расчетной работе [7];  $x = 1-2$ ,  $y = 1-3.5$  в работе [8]. Полученные в настоящей работе ВАХ можно преобразовать в координаты  $j/p_{\text{He}}^2-U$  и  $j/N_{\text{He}}^2-U$ , где  $N_{\text{He}}$  — концентрация атомов рабочего газа. Оценка усредненной температуры осуществлялась аналогично данной работе [5] и согласно работе [9]. Получившиеся зависимости приведены на рис. 1, б. Из вставки к рисунку видно, что зависимости  $j/N_{\text{He}}^2(U)$  полностью совпадают для всех исследованных

давлений гелия с показателем степени  $x = 2.08 \pm 0.10$ . Это указывает на то, что ВАХ высоковольтного АТР характеризуются выполнением условий подобия. На рис. 1, с для зависимостей  $j/p_{\text{He}}^2(U)$  и  $j/N_{\text{He}}^2(U)$  представлена динамика изменения параметров  $y_{j/p_{\text{He}}^2}(U)$  и  $y_{j/N_{\text{He}}^2}(U)$  соответственно, которые для всего диапазона исследованных напряжений и давлений являются экстремальными функциями с минимумом при напряжении  $U = 400-900$  В. Обращает на себя внимание то, что в зависимостях  $y_{j/p_{\text{He}}^2}(U)$  для  $p_{\text{He}} > 4.67$  Торр имеется диапазон со значениями  $y_{j/p_{\text{He}}^2}(U) < 0$ .

На рис. 2 представлены результаты измерения эффективностей  $\eta$  и  $\eta_{\text{col}}$  для давлений  $p_{\text{He}} = 4.67, 7.67$  и  $10.2$  Торр. Общей тенденцией является то, что величина  $\eta$  сублинейно нарастает с увеличением напряжения при постоянном давлении и с увеличением давления при постоянном напряжении. Достигнуто максимальное значение  $\eta \approx 80\%$  при  $U = 2800$  В и  $p_{\text{He}} = 10.2$  Торр. При этом величина  $\eta_{\text{col}}$  (доля энергии ЭП, достигающего анода) увеличивается с ростом  $U$ , но имеет обратную зависимость от давления:  $\eta_{\text{col}} \sim 1/p_{\text{He}}$ . Это свидетельствует о том, что с увеличением давления газа при возрастании потерь энергии электронов увеличение общей эффективности генерации ЭП происходит за счет уменьшения доли рассеиваемой мощности в разрядном промежутке.

Представляется интересным сравнить полученные значения  $\eta$  с результатами работ [4,8], в которых калориметрическим способом проведены измерения эффективности генерации ЭП в АТР в гелии. В работе [4] исследования АТР проведены с титановым катодом в следующих экспериментальных условиях: межэлектродное расстояние  $d_{ca} = 2.1$  см,  $p_{\text{He}} = 1-16$  Торр, предельный вакуум  $\sim 10^{-5}$  Торр, типичное натекание  $10^{-4}$  Торр/ч. В работе [8]

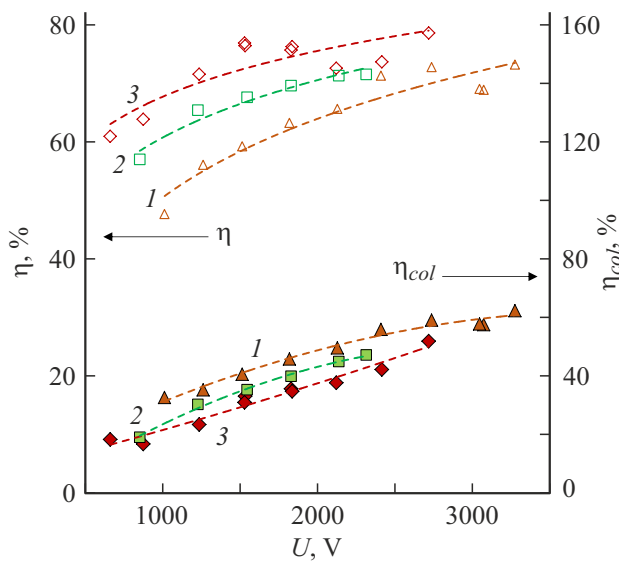


Рис. 2. Зависимости  $\eta(U)$  и  $\eta_{\text{col}}(U)$  при  $p_{\text{He}} = 4.67$  (1),  $7.67$  (2) и  $10.2$  Торр (3).

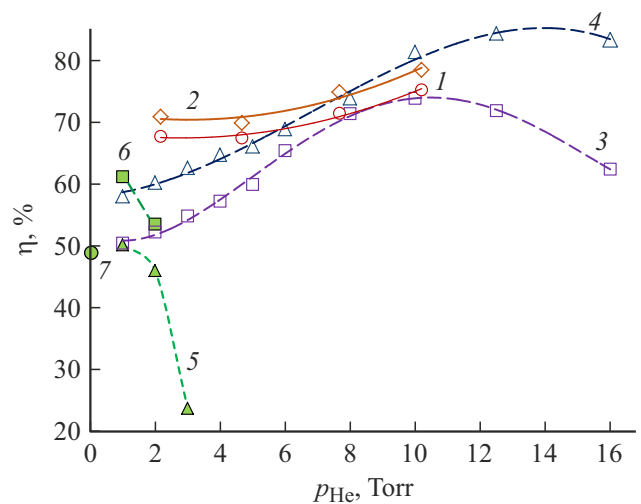


Рис. 3. Зависимости  $\eta(p_{\text{He}})$ . 1, 2 — данные настоящей работы, SiC-катод,  $U = 2400$  и  $2700$  В соответственно; 3, 4 — Ti-катод,  $U = 2500$  и  $3500$  В соответственно; 5 — LaB<sub>6</sub>-катод,  $U = 3500$  В; 6 — Mo-MgO-катод,  $U = 3500$  В; 7 — Al-катод,  $U = 4000$  В.

исследовались Mo-MgO- и LaB<sub>6</sub>-катоды ( $d_{ca} = 13$  см,  $p_{\text{He}} = 0.5-3$  Торр, предельный вакуум в установке не превышал  $\sim 10^{-4}$  Торр). На рис. 3 представлено сравнение зависимостей  $\eta(p_{\text{He}})$  для различных  $U$ , полученных в настоящей работе и в [4,8], а также величина  $\eta$  из работы [10], вычисленная согласно формуле  $\eta = \gamma/(\gamma + 1)$ , где  $\gamma$  — коэффициент вторичной эмиссии электронов. Из рис. 3 видно, что в более „чистых“ разрядных условиях в исследованном диапазоне  $U$  достигаются значительно большие эффективности генерации электронного пучка.

Из полученных результатов видно, что исследованный высоковольтный АТР, функционирующий в возможно достигаемых „чистых“ условиях, характеризуется следующими оригинальными особенностями:

- типично монотонно возрастающие ВАХ с ростом давления принимают в координатах  $j-U$  вид с отрицательным показателем степени зависимости  $j$  от  $U$ , что соответствует и подтверждает результаты исследований АТР с другими типами холодных катодов (титан, молибден [4,5]);

- разряд функционирует при значительно больших давлениях рабочего газа (гелия) с сохранением больших эффективностей генерации электронного пучка, при этом для него характерно увеличение эффективности генерации ЭП с ростом давления;

- исследование катода демонстрирует уменьшение распыления эмитирующей поверхности при прочих равных условиях.

Совокупность перечисленных особенностей предопределяет перспективность таких разрядов для разработки чистых плазменных технологий.

## Финансирование работы

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

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейнфельд, А.А. Новиков, *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* (Энергоатомиздат, М., 1989).
- [2] А.И. Головин, А.И. Шлойдо, *Успехи прикладной физики*, **4** (5), 439 (2016).
- [3] А.С. Климов, А.А. Зенин, Д.Б. Золотухин, А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков, *Успехи прикладной физики*, **7** (3), 249 (2019).
- [4] П.А. Бохан, П.П. Гугин, Д.Э. Закревский, М.А. Лаврухин, *Физика плазмы*, **45** (11), 1022 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119100019 [P.A. Bokhan, P.P. Gugin, D.E. Zakrevsky, M.A. Lavrukhin, *Plasma Phys. Rep.*, **45** (11), 1035 (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19100015].
- [5] P.A. Bokhan, P.P. Gugin, M.A. Lavrukhin, V.A. Kim, G.V. Shevchenko, D.E. Zakrevsky, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **31** (12), 125009 (2022). DOI: 10.1088/1361-6595/acaac6
- [6] К.А. Клименко, Ю.Д. Королев, *ЖТФ*, **60** (9), 138 (1990). [K.A. Klimenko, Yu.D. Korolev, *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **35**, 1084 (1990)].
- [7] К.Н. Ульянов, *ТВТ*, **43** (5), 645 (2005). [K.N. Ul'yanov, *High Temp.*, **43** (5), 641 (2005). DOI: 10.1007/s10740-005-0107-3].
- [8] J.J. Rocca, J.D. Meyer, M.R. Farrell, G.J. Collins, *J. Appl. Phys.*, **56** (3), 790 (1984). DOI: 10.1063/1.334008
- [9] M.J. Kushner, B.E. Warner, *J. Appl. Phys.*, **54** (6), 2970 (1983). DOI: 10.1063/1.332499
- [10] P. Hartmann, H. Matsuo, Y. Ohtsuka, M. Fukao, M. Kando, Z. Donkó, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (1), 3633 (2003). DOI: 10.1143/JJAP.42.3633