

УДК 533.9.01.
EDN: BCTQVG

PACS: 52.80.Hc; 41.75.Fr; 52.20.-j; 52.25.Jm

Эффективность генерации электронного пучка в высоковольтном аномальном тлеющем разряде постоянного тока в гелии, неоне и аргоне© П. А. Бохан¹, П. П. Гугин¹, М. А. Лаврухин¹, Д. Э. Закревский^{1,2}, Г. В. Шевченко^{1,2*}¹ Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, 630090 Россия

*E-mail: shevchenko@isp.nsc.ru

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 630073 Россия

Статья поступила в редакцию 15.05.2026; после доработки 1.06.2026; принята к публикации 06.08.2026

Шифр научной специальности: 1.3.5

Проведено сравнительное исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) и энергетической эффективности генерации электронного пучка в высоковольтном аномальном тлеющем разряде постоянного тока в гелии, неоне и аргоне при напряжениях выше 1000 В. Показано, что в сверхчистых условиях и при тщательном обезгаживании материала катода ВАХ приобретают немонотонный вид, а общая эффективность генерации электронного пучка достигает ~80 % в гелии, ~90 % в неоне и 40 % в аргоне. Полученные результаты открывают перспективы повышения эффективности генерации электронного пучка в существующих высоковольтных разрядных генераторах для применения в плазменных технологиях.

Ключевые слова: газовый разряд, гелий, неон, аргон, электронный пучок, эффективность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-25-32

Введение

Газоразрядные генераторы электронных пучков (ЭП) представляют интерес как компактные источники потоков быстрых электронов, формируемых непосредственно в газовой среде за счёт ускорения заряженных частиц в сильных электрических полях [1–3], показывающие что генерация ЭП непосредственно в газовой среде является перспективным направлением развития электронно-пучковых и плазменных технологий, поскольку позволяет отказаться от систем дифференциальной откачки и фольговых окон, характерных для вакуумных ускорителей. При этом рассмотрение как импульсных, так и стационарных генераторов, основанных на различных типах газового разряда, указывает на актуальность сравнительного исследования механизмов формирования пучка, его энергетической эффективности и рабочих диапазонов давления

для разрядов разного вида. Для простейшего представителя видов разряда – аномального тлеющего разряда (АТР) постоянного тока в инертных газах характерна монотонно возрастающая вольт-амперная характеристика [4–6]. В работах [7, 8] показано, что в высоковольтном АТР в гелии при давлениях 2–10 Торр в условиях минимизации контролируемых и неконтролируемых примесей рабочей среды и материала катода наблюдается ВАХ, в которых при увеличении давления появляются участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением, при этом общая эффективность генерации электронного пучка (ЭП) достигает ~80 % [7].

Понимание особенностей и процессов, протекающих в таких, достаточно простых типах разрядов, актуально для разработки плазменных технологий. ВАХ АТР в значительной степени зависят от реализованных экспериментальных условий [8]. В неконтро-

лируемых условиях газовой среды, содержащей молекулярные компоненты, при недостаточно очищенной поверхности катода ВАХ имеют типичный классический монотонно возрастающий вид. В чистых условиях и при тщательной обезгаживании материала катода ВАХ приобретают S образный вид (в координатах напряжение U – ток I). Загрязнения поверхности катода и наличие молекулярных компонент в газовой среде приводят к изменению роли, состава и энергии бомбардирующих холодный катод частиц. При условии зависимости эмиссионных свойств катода от модификации эмитирующего слоя за счёт имплантации в поверхность рабочих частиц функциональные параметры АТР (разрядные напряжение, ток и характер его протекания, эффективность генерации ЭП) будут определяться чистотой рабочей среды и состоянием эмитирующей поверхности.

Представляется интерес исследование особенностей высоковольтного АТР в других инертных газах. Целью настоящей работы являлось сравнительное исследование ВАХ и энергетической эффективности генерации ЭП в АТР в гелии, неоне и аргоне в режиме постоянного тока при повышенных (более 1000 В) напряжениях в условиях минимизации контролируемых и неконтролируемых примесей рабочей среды и материала катода.

Экспериментальная установка

Исследования разряда проводились в разрядной ячейке с плоскими полированными электродами: катодом из реакционно-спечённого карбида кремния и титановым анодом. Межэлектродное расстояние составляло 3 см. Electrodes были разделены стеклянным цилиндром, а также многослойным изолятором из керамических пластин Al_2O_3 , размещённых вблизи катода. Внутренние диаметры отверстий в пластинах составляли 1,6 и 2,3 см, что ограничивало площадь активной разрядной зоны величиной 2 см^2 . Температура ячейки контролировалась в ходе эксперимента и поддерживалась на уровне $T \leq 50^\circ\text{C}$ за счёт использования охлаждающих элементов – радиаторов и кулеров.

Эксперименты проводились в режиме прокачки рабочего газа, который подавался

через охлаждаемую жидким азотом угольную ловушку со скоростью ~ 100 мл/мин. Использовались инертные газы с объёмной долей не менее: гелий He – 99,9999 %, неон Ne – 99,999 %, аргон Ar – 99,998 %. Чистота рабочего газа оценивалась по отношению светимостей молекулярных полос водорода, азота и кислорода и по масс-спектроскопическим измерениям при помощи масс-спектрометра SRS RGA 200. Давление газов измерялось емкостным датчиком Thyracont VCC200MA4 с точностью $\pm 0,25$ %. Использовался источник постоянного тока с регулируемым напряжением $U = 0\text{--}4000$ В и балластным сопротивлением $R = 20\text{--}600$ кОм.

Перед каждым циклом измерений параметров разряда проводилось обезгаживание ячейки. Подробно процедура рассмотрена в [9]. Изменения ВАХ в процессе обезгаживания ячейки и кондиционирования катода характеризовались постепенным уменьшением разрядного тока. Критерием достижения рабочего режима являлось постоянство и стабильная воспроизводимость параметров ВАХ в течение всех циклов и времени измерений. В настоящей работе после ~ 50 часов ВАХ принимали установившийся характер.

Энергетическая эффективность генерации электронного пучка η есть доля мощности разряда, переданная быстрой электронной компоненте, включая энергию электронов, достигших анода η_{col} и энергию, потерянную ими в газе при возбуждении, ионизации и упругих столкновениях η_{ds} . Измерение η осуществлялось калориметрическим методом и определялась как отношение мощности пучка быстрых электронов к полной мощности, затрачиваемой на поддержание разряда: $\eta = \eta_{\text{ds}} + \eta_{\text{col}}$; $\eta_{\text{ds}} = P_{\text{ds}}/P$ и $\eta_{\text{col}} = P_{\text{col}}/P$, где P_{ds} – мощность, рассеиваемая в разрядном промежутке, P_{col} – мощность, выделяющаяся на аноде, а $P = U \times I$ – полная мощность разряда, где U – напряжение разряда, а I – ток разряда.

Методика определения η_{ds} и η_{col} основывалась на предварительной калибровке [7, 10]. Для этого в отсутствие разряда измерялись зависимости установившегося приращения температуры ΔT на внешней стенке ячейки и на аноде-коллекторе от мощности, подаваемой на встроенные омические нагреватели. В ходе эксперимента регистрировались значения ΔT в соответствующих зонах, после чего

по калибровочным зависимостям восстанавливались величины P_{ds} и P_{col} . На основании полученных значений рассчитывались эффективности η_{ds} , η_{col} и полная эффективность генерации электронного пучка η .

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 в качестве примера представлено семейство вольт-амперных характеристик АТР в координатах $I-U$ в гелии при давлении $p_{He} = 0,9$ и 10 Торр, неоне $p_{Ne} = 0,5$ и 2 Торр и аргона $p_{Ar} = 0,5$ и 0,8 Торр, измеренные после выполнении процедуры обезгаживания ячейки и тренировки катода.

Экспериментальные результаты продемонстрировали:

в гелии с ростом давления зависимости $I(U)$ изменяют свой характер и при $p_{He} \geq 4,3$ Торр они «ломаются» – перестают быть монотонно возрастающими. При увеличении напряжения появляются участки уменьшения тока, причём величина этого падения возрастает с увеличением давления газа, достигая максимума для наибольшего давления. Например, для ВАХ при $p_{He} = 10$ Торр можно проследить три участка:

- рост I с увеличением напряжения до $U \approx 400-500$ В;
- уменьшение I при увеличении напряжения до $U \approx 1100-1400$ В;
- повторный рост I с увеличением напряжения.

В [11] экспериментально было показано, что в высоковольтном разряде в гелии, в котором генерируются электронные пучки с $\sim$ кэВ энергиями, ВАХ имеют вид $j \sim p^x U_c^y$ с показателями степени $x = 2$; $y = 3$; где j – плотность тока; U_c – катодное падение потенциала, которое в условиях высоких значений U_c практически равно приложенному к разрядному промежутку напряжению U . Динамика изменения параметров x и y позволяет проследить трансформацию ВАХ при изменении разрядных условий. В настоящей работе в разряде постоянного тока в гелии показатель степени ‘ y ’ изменяется на всей области ВАХ:

- для всех давлений $y > 3$ при $U < 300$ В;
- при $U \approx 750-900$ В достигает своего минимума со значением $y \approx 1$ при $p_{He} \approx \approx 0,9$ Торр;
- становится отрицательным $y \approx -0,3$ при $p_{He} \approx 10$ Торр и увеличивается, например при $U \approx 2100$ В ‘ y ’ $\approx 1,8$ и 1 при $p_{He} \approx 0,9$ и 10 Торр, соответственно.

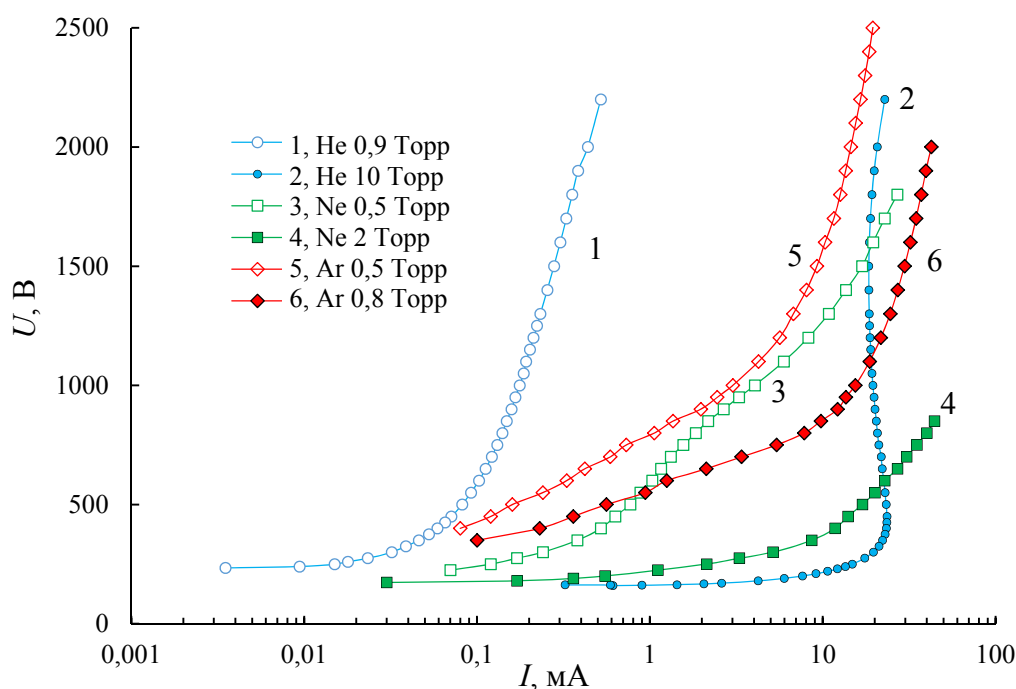


Рис. 1. Зависимость разрядного тока I от напряжения U при разных давлениях рабочего газа p : He, $p_{He} = 0,9$ (1), 10 Торр (2); Ne, $p_{Ne} = 0,5$ (3), 2 Торр (4); Ar, $p_{Ar} = 0,5$ (5), 0,8 Торр (6)

В неоне изменения ВАХ при горении разряда в чистых условиях менее выражены. С уменьшением давления газа наблюдается трансформация ВАХ, но в исследуемом диапазоне давления участки с отрицательной дифференциальной проводимостью не были получены. До напряжений $U \approx 300$ В показатель степени ' y ' > 3 , при $U \approx 500$ – 600 В минимальное значение ' y ' $\approx 1,5$ – $1,8$; при дальнейшем росте U наблюдается его увеличение. Это, аналогично со случаем в гелии, может свидетельствовать о смене механизма эмиссии электронов [9]. При $p_{\text{Ne}} = 0,5$ Торр зависимость $y(U)$ имеет более сложный вид: при $U \approx 1000$ В достигается максимальное значение ' y ' ≈ 4 , а при дальнейшем увеличении U параметр ' y ' уменьшается. Ранее такое поведение зависимости $y(U)$ наблюдалось в «открытом» разряде в гелии [9].

В аргоне трансформация ВАХ не наблюдалась, минимальное значение ' y ' достигнуто не было. При $U > 300$ В значения ' y ' близки для всех исследованных давлений и уменьшаются от ' y ' ≈ 5 при $U \approx 300$ – 600 В до ' y ' $\approx 1,3$ при $U \approx 1500$ – 2800 В.

На рис. 2а–в представлены результаты измерения долей энергии, рассеянных в разрядном промежутке η_{ds} , на аноде – коллекторе η_{col} и их суммарная эффективность η в гелии ($p_{\text{He}} = 4,7$ и $10,2$ Торр), неоне ($p_{\text{Ne}} = 0,5$ и $1,5$ Торр) и аргоне ($p_{\text{Ar}} = 0,35$ и 1 Торр). Общей тенденцией является увеличение эффективности генерации быстрых электронов с ростом U для всех исследуемых газов и давлений. При этом характер влияния давления различен (рис. 2в): в гелии с увеличением p_{He} эффективность растёт как $\eta \sim p_{\text{He}}$, в неоне эта зависимость выражена слабо, а в аргоне наблюдается обратная зависимость – $\eta \sim 1/p_{\text{Ar}}$. При $U \approx 3000$ В максимальная эффективность реализуется в неоне $\eta \approx 90$ %, в гелии она составляет $\eta \approx 80$ %, в аргоне не превышает $\eta \approx 40$ % при давлениях гелия, неона и аргона $10,2$, $0,5$ и $0,35$ Торр, соответственно. Зависимости доли энергии пучка, выделяющейся на аноде – коллекторе $\eta_{col}(U)$ имеют однопиковый характер. С увеличением напряжения η_{col} монотонно возрастает. Максимальные значения реализуются в ряду $\text{Ar} \rightarrow \text{Ne} \rightarrow \text{He}$, при этом с увеличением давления для каждого

из газов η_{col} уменьшается. Более сложный характер имеют зависимости доли энергии, выделяющейся в разрядном промежутке $\eta_{ds}(U)$. В диапазоне напряжений $U = 1000$ – 3500 В для аргона наблюдается монотонный слабый рост, для неона – резкое возрастание при $U = 1000$ – 1500 В с последующим насыщением при $U \geq 1500$ – 2000 В, в гелии эта зависимость имеет экстремальный характер с максимумом в области $U \approx 1000$ – 1500 В.

Хорошо видно, что вклады величин η_{ds} и η_{col} в полную эффективность генерации электронного пучка η существенно различаются в зависимости от рода газа. Например, в гелии при $p_{\text{He}} = 4,7$ Торр и $U = 2100$ В суммарная эффективность генерации $\eta \approx 66$ % формируется как $\eta_{col} \approx 50$ % и $\eta_{ds} \approx 16$ %. В свою очередь, для неона при том же напряжении $U = 2000$ В и $p_{\text{Ne}} = 1,5$ Торр наблюдается $\eta \approx 71$ %, $\eta_{ds} \approx 43$ % и $\eta_{col} \approx 28$ %, а для аргона при $p_{\text{Ar}} = 0,75$ Торр и том же напряжении $\eta \approx 31$ %, $\eta_{ds} \approx 23$ % и $\eta_{col} \approx 8$ %.

Эффективность η связана с суммарным коэффициентом эмиссии $\langle \gamma \rangle$ соотношением $\eta = \langle \gamma \rangle / (\langle \gamma \rangle + 1)$ [12]. В настоящее время практически отсутствуют надежные данные по $\langle \gamma \rangle$ в чистых условиях. Для сравнения можно использовать результаты [13], в которой получена величина $\langle \gamma \rangle \approx 0,98$ в гелии при $U = 4000$ В, обусловленной в основном эмиссией под действием быстрых атомов. В наших условиях $\langle \gamma \rangle \approx 2$ при $U = 2000$ В, что свидетельствует о значительном вкладе фотоэмиссии в ток электронов с катода. Можно оценить величину эффективности генерации электронного пучка исходя из доли потерь энергии в разрядной зоне. В высоковольтном АТР основная часть приложенного напряжения сосредоточена в катодном слое. В квазинейтральной области за катодным падением электрическое поле значительно меньше, поэтому вклад низкоэнергетической электронной компоненты в прямое энерговыделение пренебрежительно мал. При напряжении на катоде U максимальная энергия убегающих электронов может достигнуть $E \approx eU$. Доля энергии, теряемой такими электронами в области за катодным падением потенциала, составляет $\sim (\eta_{ds} \cdot E)$. Доля энергии η_{ex} электронного пучка, затрачиваемой на возбуждение

резонансных состояний атома рабочего газа без учета рекомбинационного заселения, имеет значения $\eta_{ex} \approx 0,3-0,4$ [14–16]. С учетом геометрического фактора $R_s \approx 0,112$, характеризующего перехват излучения, на катод попадает количество фотонов: $N_{ph} \approx eU \cdot \eta_{ex} \cdot \eta_{ds} \cdot R_s / h\nu$, где $h\nu = 19,8$; 16,7 и

11,6 эВ – энергия резонансных фотонов в гелии, неоне, аргоне, соответственно. Следовательно, количество генерируемых фотоэлектронов N_e , рожденных благодаря излучению из разрядного промежутка:

$$N_e \approx eU \cdot \eta_{ex} \cdot \eta_{ds} \cdot \gamma_{ph} \cdot R_s / h\nu. \quad (1)$$

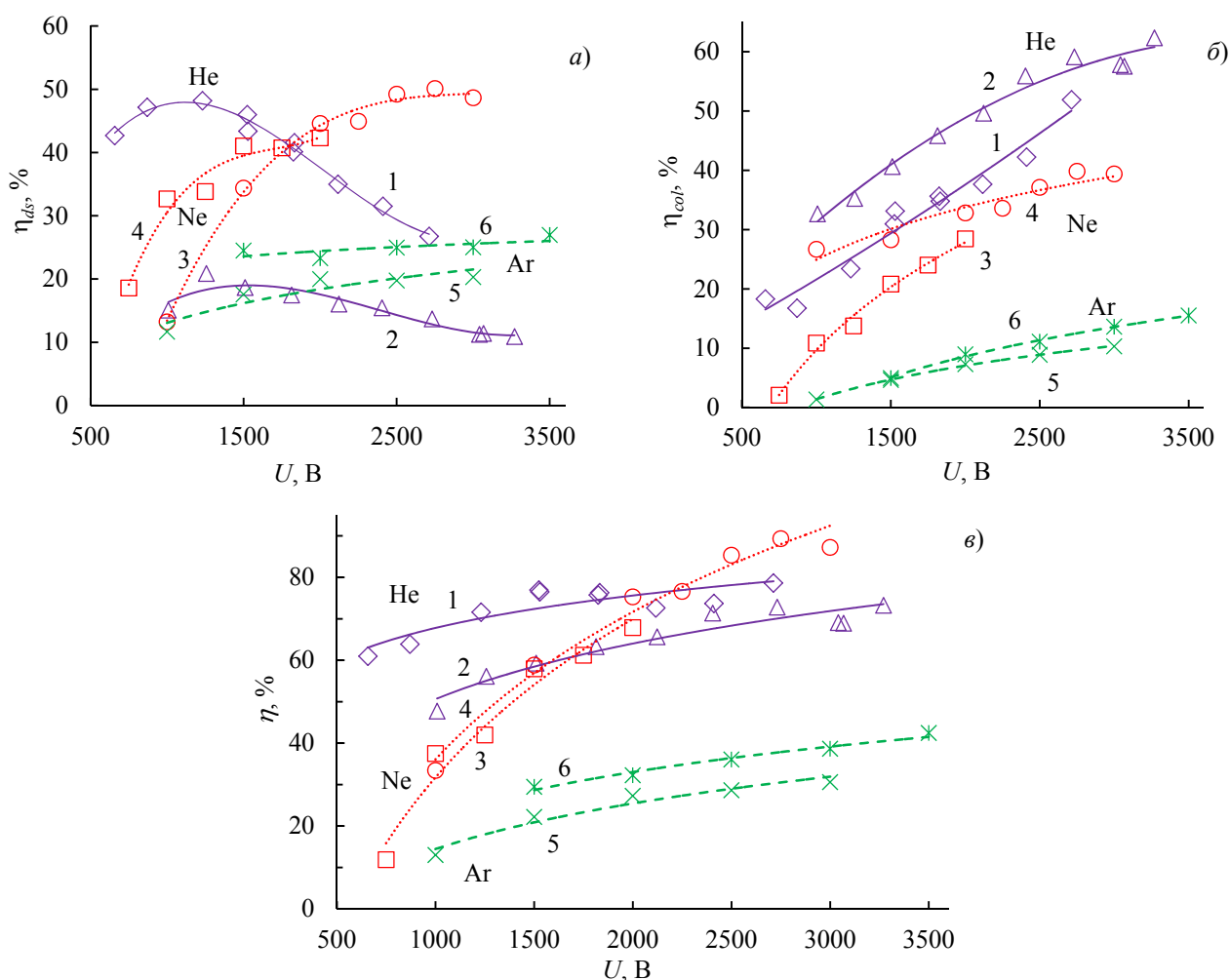


Рис. 2. Сравнение зависимостей долей энергии, теряемых в разрядном промежутке $\eta_{ds}(U)$ – (а), на коллекторе $\eta_{col}(U)$ – (б) и их суммы $\eta(U)$ – (в) от напряжения U при разных давлениях рабочего газа p в He ($p_{He} = 10,2$ (1), 4,7 (2) Торр), Ne ($p_{Ne} = 1,5$ (3), 0,5 (4) Торр) и Ar ($p_{Ar} = 1$ (5), 0,35 (6) Торр)

Расчет по формуле (1) показывает, что в He, Ne, Ar при $U = 2000$ В при $p_{He} = 10$ Торр, $p_{Ne} = 1$ Торр и $p_{Ar} = 0,75$ Торр и величинах коэффициента фотоэмиссии $\gamma_{ph} \approx 0,3$; 0,28 и 0,15 [17, 18] количество фотоэлектронов, рожденных на один первичный быстрый электрон $N_e \sim 0,505$; 0,50 и 0,196, соответственно. В предположении, что при $U \geq 2000$ В пучок формируется преимущественно за счёт фотоэмиссии,

то расчётная эффективность генерации электронного пучка составила бы $\eta \approx 50,5$; 50 и 19,6 %, соответственно. Из полученных оценок видно, что расчётные значения меньше экспериментально полученных ($\eta \approx 72,6$; 75,5 и 30,6 %). Это говорит о том, что в реальных условиях АТР вклад фотоэмиссии является существенным, но не единственным источником генерации электронов. Дополнительный

вклад могут вносить иные каналы вторичной электронной эмиссии (прежде всего потенциальной под действием ионов и метастабильных атомов). Отметим, что геометрический фактор R_s не учитывает неравномерное возбуждение вдоль разрядного промежутка, а η_{ex} в предлагаемой оценке не зависит от энергии электронов и принимается постоянной.

Заключение

Таким образом, в работе проведено сравнительное исследование аномального тлеющего разряда в инертных газах (He, Ne, Ar) при напряжениях свыше 1000 В в условиях высокой чистоты газовой среды и материала катода. Показано, что максимальная эффективность генерации ЭП в исследованных условиях достигается в гелии $\eta \approx 80\%$, неоне $\eta \approx 90\%$ и аргоне $\eta \approx 40\%$ при немонотонной форме ВАХ. Оценки η в предположении работы в условиях модификации катода рабочим газом демонстрируют, что основным механизмом поддержания разряда является фотоэмиссия, а разряд в таких условиях характеризуется высокой энергетической эффективностью электронного пучка. Дальнейшее развитие направления этой работы предполагает исследование АТР в диапазоне напряжений > 4 кВ для получения пучков с энергиями порядка $\sim$ кэВ и теоретическое исследование механизмов эмиссии электронов.

*Исследование выполнялось при поддержке
Российского Научного Фонда,
грант № 24-19-00037. Часть работы была
выполнена в рамках государственного задания
FWGW-2025-0019.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришиков А. А., Воробьев М. С., Дорошкевич С. Ю., Коваль Н. Н. / Приборы и техника эксперимента. 2025. № 2. С. 4–25.
<https://doi.org/10.31857/S0032816225020012>
2. Kozyrev A., Tarasenko V. / Plasma. 2024. Vol. 7. P. 201–232. <https://doi.org/10.3390/plasma7010013>
3. Головин А. И., Шлойдо А. И. / Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 439–448.
4. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Т. 1. – М.; Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952.
5. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – Долгопрудный: Интеллект, 2009.
6. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. – Wiley-Interscience, 2005.
7. Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э., Шевченко Г. В. / Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 22. С. 3–6.
<https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.22.59126.20045>
8. Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э., Лаврухин М. А. / Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 11. С. 1022–1040. <https://doi.org/10.1134/S0367292119100019>
9. Bokhan P. A., Gugin P. P., Lavrukhin M. A., Kim V. A., Shevchenko G. V., Zakrevsky D. E. / Plasma Sources Sci. Technol. 2022. Vol. 31. № 12. P. 125009.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/acaac6>
10. Rocca J. J., Meyer J. D., Farrell M. R., Collins G. J. / J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. № 3. P. 790–797.
<https://doi.org/10.1063/1.334008>
11. Клименко К. А., Королев Ю. Д. / ЖТФ. 1990. Т. 60. № 9. С. 138–142.
12. Завьялов М. А., Крейнделъ Ю. Е., Новиков А. А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. Hartmann P., Matsuo H., Ohtsuka Y., Fukao M., Kando M., Donkó Z. / Jpn. J. Appl. Phys. 2003. Vol. 42. № 6R. P. 3633–3640. <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.3633>
14. Алхазов Г. Д. / ЖТФ. 1971. Т. 41. № 12. С. 2513–2519.
15. Сыцько Ю. И., Яковленко С. И. / Физика плазмы. 1976. Т. 2. № 1. С. 63–71.
16. Platzman R. L. / Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1961. Vol. 10. № 2–3. P. 116–127.
[https://doi.org/10.1016/0020-708X\(61\)90108-9](https://doi.org/10.1016/0020-708X(61)90108-9)
17. Bokhan P. A., Zakrevsky D. E. / Phys. Rev. E. 2013. Vol. 88. № 1. P. 013105.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.013105>
18. Бохан П. А., Закревский Д. Э. / ЖТФ. 2007. Т. 77. № 1. С. 109–116.

Electron beam generation efficiency in a high-voltage abnormal DC glow discharge in helium, neon, and argon

P. A. Bokhan¹, P. P. Gugin¹, M. A. Lavrukhin¹, D. E. Zakrevsky^{1,2},
and G. V. Shevchenko^{1,2*}

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia

* E-mail: shevchenko@isp.nsc.ru

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia

Received 15.05.2026; revised 1.06.2026; accepted 06.08.2026

The aim of this work was to carry out a comparative study of the current-voltage characteristics and the energy efficiency of electron beam generation in a high-voltage abnormal DC glow discharge in helium, neon, and argon at voltages above 1000 V. It is shown that, under ultra-clean conditions and with thorough degassing of the cathode material, the current-voltage characteristics acquire a nonmonotonic form, while the total efficiency of electron beam generation reaches approximately 80 % in helium, approximately 90 % in neon, and 40 % in argon. The results of this work open up prospects for increasing the efficiency of electron beam generation in existing high-voltage discharge generators for applications in plasma technologies.

Keywords: gas discharge, helium, neon, argon, electron beam, efficiency.

REFERENCES

1. Grishkov A. A., Vorob'ev M. S., Doroshkevich S. Yu., and Koval N. N., Instruments and Experimental Techniques **68** (4), 187–205 (2025). <https://doi.org/10.1134/S0020441225700320>
2. Kozyrev A. and Tarasenko V., Plasma **7** (1), 201–232 (2024). <https://doi.org/10.3390/plasma7010013>
3. Golovin A. I. and Shloido A. I., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics **4** (5), 439–448 (2016) [in Russian].
4. Granovskii V. L. Electric Current in Gas. Vol. 1. Moscow–Leningrad: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1952 [in Russian].
5. Raizer Yu. P. Gas Discharge Physics. Dolgoprudny: Intellect, 2009 [in Russian].
6. Lieberman M. A. and Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Wiley-Interscience, 2005.
7. Bokhan P. A., Gugin P. P., Zakrevsky D. E., and Shevchenko G. V., Technical Physics Letters **50** (11), 55–58 (2024). <https://doi.org/10.61011/TPL.2024.11.59668.20045>
8. Bokhan P. A., Gugin P. P., Zakrevsky D. E., and Lavrukhin M. A., Plasma Physics Reports **45**, 1035–1052 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063780X19100015>
9. Bokhan P. A., Gugin P. P., Lavrukhin M. A., Kim V. A., Shevchenko G. V., and Zakrevsky D. E., Plasma Sources Sci. Technol. **31** (12), 125009 (2022). <https://doi.org/10.1088/1361-6595/acaac6>
10. Rocca J. J., Meyer J. D., Farrell M. R., and Collins G. J., J. Appl. Phys. **56** (3), 790–797 (1984). <https://doi.org/10.1063/1.334008>
11. Klimenko K. A. and Korolev Yu. D., Sov. Phys. Tech. Phys. **35** (9), 1084–1086 (1990).
12. Zav'yalov M. A., Kreindel Yu. E., and Novikov A. A. Plasma Processes in Technological Electron Guns. Moscow: Energoatomizdat, 1989 [in Russian].
13. Hartmann P., Matsuo H., Ohtsuka Y., Fukao M., Kando M., and Donkó Z., Jpn. J. Appl. Phys. **42** (6R), 3633–3640 (2003). <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.3633>
14. Alkhazov G. D., Sov. Phys. Tech. Phys. **16** (9), 1995 (1972).
15. Syts'ko Yu. I. and Yakovlenko S. I., Fiz. Plazmy **2** (1), 63–71 (1976) [in Russian].

16. Platzman R. L., Int. J. Appl. Radiat. Isot. **10** (2–3), 116–127 (1961).
[https://doi.org/10.1016/0020-708X\(61\)90108-9](https://doi.org/10.1016/0020-708X(61)90108-9)
17. Bokhan P. A. and Zakrevsky D. E., Phys. Rev. E **88** (1), 013105 (2013).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.88.013105>
18. Bokhan P. A. and Zakrevsky D. E., Technical Physics **52**, 104–112 (2007).
<https://doi.org/10.1134/S1063784207010185>

Об авторах

Бохан Петр Артемович, д.ф.-м.н., Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13). E-mail: bokhan@isp.nsc.ru SPIN-код: 2695-2543, AuthorID: 608175, ORCID: 0000-0003-2320-8317

Гугин Павел Павлович, к.ф.-м.н., Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13). E-mail: gugin@isp.nsc.ru SPIN-код: 2691-5880, AuthorID: 724925, ORCID: 0000-0002-4431-471X

Лаврухин Максим Александрович, Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13). E-mail: lavrukhin@isp.nsc.ru SPIN-код: 2262-5122, AuthorID: 725193, ORCID: 0000-0002-9153-9436

Закревский Дмитрий Эдуардович, д.ф.-м.н., Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13); Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20). E-mail: zakrdm@isp.nsc.ru SPIN-код: 1754-5506, AuthorID: 18987, ORCID: 0000-0002-6386-6683

Шевченко Глеб Владиславович, Институт физики полупроводников СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 13); Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20). E-mail: shevchenko@isp.nsc.ru SPIN-код: 4637-1090, AuthorID: 1265709, ORCID: 0000-0002-4055-0336