

Зависимость генерации пучка электронов в открытом разряде от геометрии разрядного промежутка и давления газа

© А.И. Головин, М.М. Голубев, Е.К. Егорова, А.В. Туркин, А.И. Шлойдо

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша (ГНЦ ФГУП „Центр Келдыша“),
125438 Москва, Россия
e-mail: blackash@aha.ru

(Поступило в Редакцию 29 мая 2013 г. В окончательной редакции 25 октября 2013 г.)

Проведены экспериментальные исследования работы генератора электронного пучка на основе открытого разряда в непрерывном режиме при различных давлениях воздуха и гелия. Измерены вольт-амперные характеристики разряда при различных геометрических размерах разрядного промежутка.

Введение

При практическом применении электронно-пучковых технологий необходимо выводить пучок в газовую среду, параметры которой определяются технологическим процессом. При этом давление и состав газа могут меняться в весьма широких пределах.

Так как узел вывода пучка зачастую является наиболее сложной частью электронно-пучковой установки, значительный интерес представляют способы генерации пучка непосредственно в газовой среде. Одним из перспективных направлений является использование для генерации пучка открытого разряда — аномального затрудненного высоковольтного тлеющего разряда с убегающим электроном через полый (или сетчатый) анод [1–3]. Типичным примером применения пучка убегающих электронов является пучковая накачка газовых лазеров [2,3].

В работе [1] приведены описания генератора электронного пучка (ГЭП) на основе открытого разряда и используемой нами экспериментальной установки для исследования непрерывной генерации пучков убегающих электронов. Настоящая работа является продолжением [1] и направлена на дальнейшее исследование области применимости открытого разряда и способов его реализации.

Описание конструкции ГЭП и испытательного оборудования приведено в работе [1]. Ключевыми элементами ГЭП являются плоский катод 1, диэлектрическая проставка 4 толщиной H , имеющая отверстие диаметром d и анод в виде шайбы 5 с соосным отверстием в диэлектрике отверстием диаметром $D > d$. Разрядный промежуток ГЭП образован отверстием в диэлектрике, причем толщина его выбиралась меньшей, чем нормальный размер зоны катодного падения потенциала (КПП) высоковольтного тлеющего разряда [4], что обеспечивало затрудненность разряда и работу ГЭП на левой ветви кривой Пашена.

При экспериментах измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда в различных условиях и максимальное напряжение, обеспечивающее устойчивую непрерывную генерацию пучка электронов.

Влияние геометрии разрядного промежутка на ВАХ

На рис. 1 представлены зависимости плотности тока открытого разряда в воздухе при давлении 133 Па от напряжения, измеренные для различных комбинаций d и H .

Из рисунков видно, что ВАХ практически не зависят как от толщины диэлектрика H , так и от диаметра отверстия d . Дело в том, что в исследуемой конструкции ГЭП распределение поля в плазме определяется плотностью заряженных частиц в КПП и лишь незначительно зависит от расположения анода, поэтому ВАХ не должна сколько-нибудь существенно зависеть от H .

На первый взгляд влияние диаметра отверстия d на плотность тока разряда невелико и сравнимо с влиянием толщины H . Однако зависимость тока от d имеет характерную особенность, хорошо иллюстрируемую рис. 2, где показаны зависимости полного тока разряда от диаметра отверстия для нескольких напряжений при фиксированной толщине диэлектрика. Видно, что зависимости близки к линейным, причем угол наклона прямых растет с ростом напряжения, а точка пересечения с осью абсцисс остается практически неизменной и не совпадает с началом координат.

Это может свидетельствовать о диафрагмировании потока частиц, вызывающих эмиссию с катода вплоть до невозможности поддержания самостоятельного разряда при диаметре отверстия меньше критического (для условий на рис. 2 — ~ 0.3 мм). При этом диафрагмирование может осуществляться как геометрически (уменьшение отношения d/H), так и за счет влияния диффузии ионов (и движущихся к катоду молекул) к диэлектрическим стенкам, а также за счет образования на стенках поверхностного электрического заряда.

На рис. 3 приведена фотография рабочей поверхности катода, выполненная с использованием микроскопа. Катод использовался с керамическим изолятором, имеющим диаметр отверстия $d = 0.5$ мм. Видно, что область

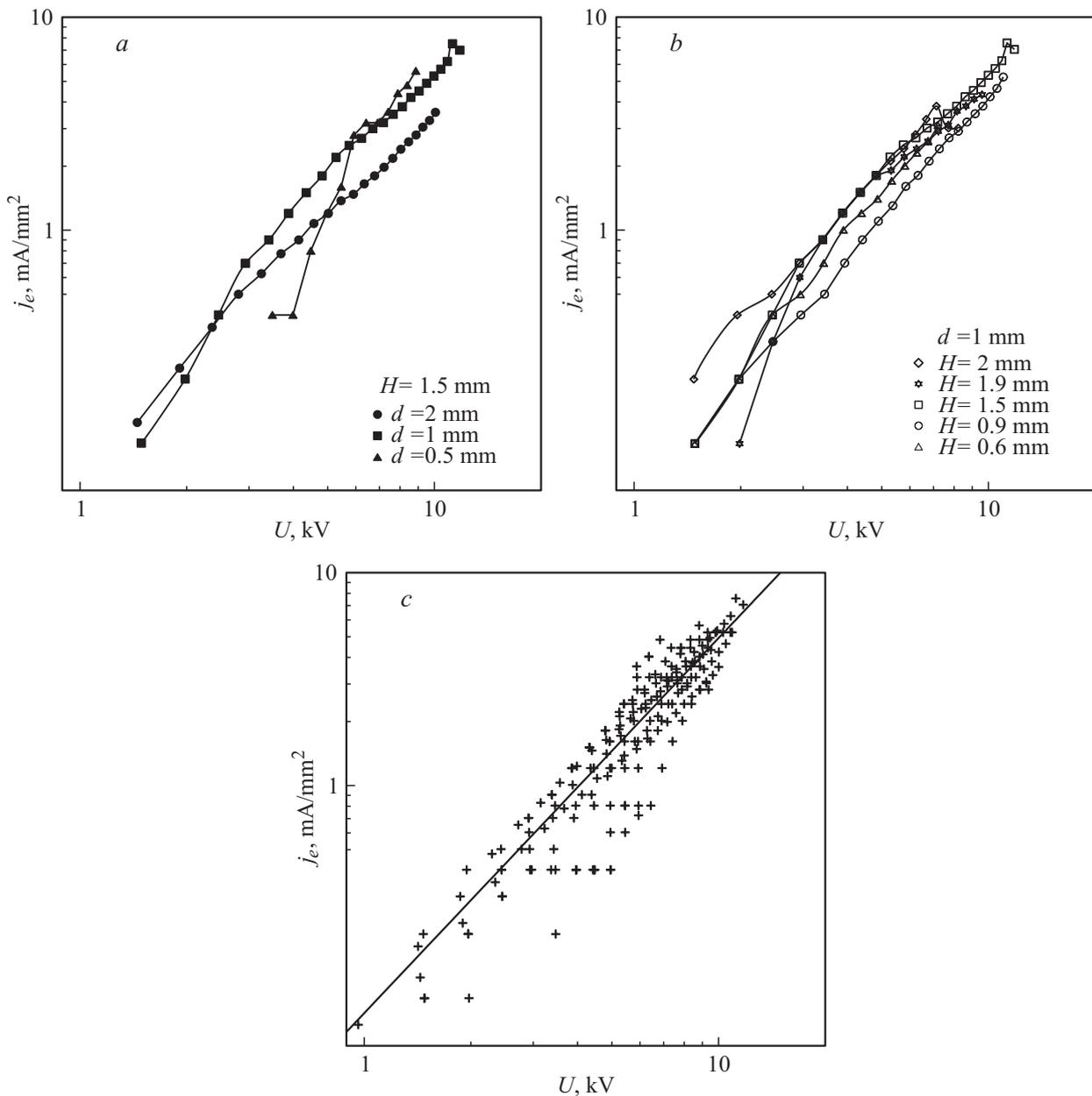


Рис. 1. Зависимости плотности тока ГЭП j_e от напряжения на катоде, катод из молибдена, давление воздуха ~ 133 Па, конструкция с размерами $D = 3$ мм: *a* — при $H = 1.5$ мм и $d = 2, 1, 0.5$ мм; *b* — при $d = 1$ мм и $H = 2, 1.9, 1.5, 0.9, 0.6$ мм; *c* — при $d = 0.5, 1, 2$ мм; толщинами G : 2, 1.9, 1.7, 1.5, 1, 0.9, 0.6, 0.5 мм, сплошная линия — аппроксимация данных степенной зависимостью с показателем степени 1.76, с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.83$.

катода, подверженная интенсивной эрозии, имеет диаметр ~ 0.2 мм. Так как основная эмиссия электронов с катода должна происходить именно в этой области, можно предположить, что диафрагмирование катода изолятором привело к уменьшению диаметра рабочей части катода на 0.3 мм, что совпадает с приведенным выше минимальным рабочим диаметром, определенным по рис. 2.

Изменение диаметра D отверстия в аноде практически не влияет на ВАХ разряда, однако при уменьшении отношения D/d до величин менее ~ 1.5 наблюдает-

ся резкое уменьшение стабильности разряда и максимального достижимого напряжения. ГЭП практически не чувствителен к увеличению отношения D/d до величин порядка 7–10, с дальнейшим ростом также наблюдается уменьшение стабильности и максимального напряжения. Кроме того, при большом диаметре D возрастает напряжение, при котором начинается работа ГЭП, что соответствует уменьшению напряженности поля в разрядном промежутке за счет увеличения расстояния между рабочей частью катода и анодом.

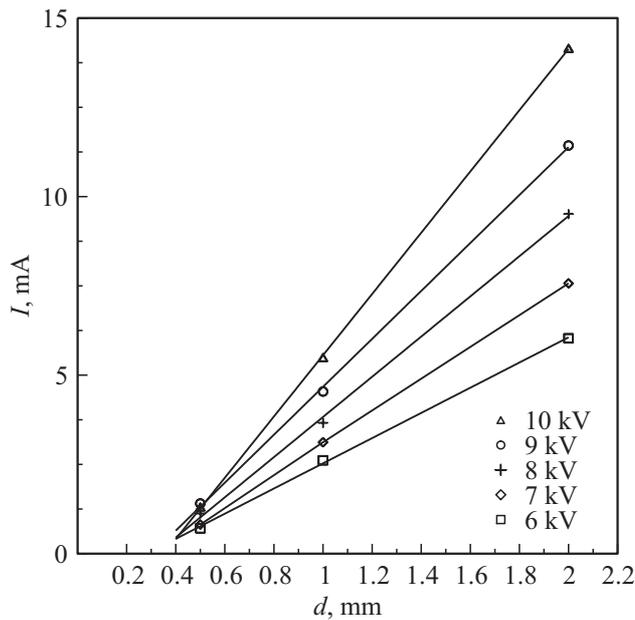


Рис. 2. Зависимости тока от диаметра d при $H = 1.5$ mm, $D = 3$ mm и напряжениях 6–10 kV, давление воздуха ~ 133 Pa.

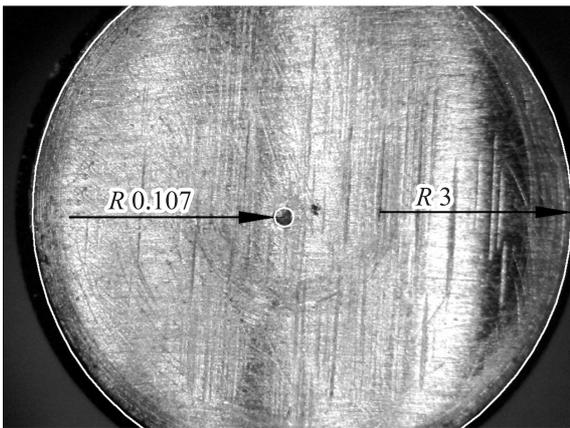


Рис. 3. Фотография катода со следами эрозии поверхности.

Зависимость ВАХ от давления воздуха

По данным [4] и множества других публикаций плотность тока разряда пропорциональна квадрату давления газа, точнее, квадрату концентрации. Нагрев газа в разрядном промежутке приведет к уменьшению концентрации, что может существенно повлиять как на саму ВАХ, так и на ее зависимость от давления в вакуумной камере, поскольку рост мощности разряда будет приводить к увеличению температуры газа в разрядном промежутке. Следовательно, будет уменьшаться концентрация, что приведет к снижению плотности тока по сравнению с „нормальным“ значением для заданных напряжения и давления. В результате нагрев газа уменьшит как наклон ВАХ, так и зависимость тока от давления.

Кроме того, отмеченный выше эффект частичного диафрагмирования катода может зависеть от давления, что также повлияет на ВАХ.

На рис. 4 приведены результаты измерений плотности тока разряда в воздухе, нормированной на квадрат давления. Характеристики, представленные на рис. 4 кривыми 1, 3, 5 и 6, были сделаны на одном экземпляре ГЭП в одну серию экспериментов — с последовательным увеличением давления в вакуумной камере начиная со 100 Pa (кривая 1). К сожалению, существенная эрозия катода и при длительной работе оплав и эрозия керамического изолятора вблизи рабочего отверстия не позволяют утверждать, что измерения проводились в абсолютно одинаковых условиях, даже если замена ГЭП между измерениями не осуществлялась.

С учетом этого можно утверждать, что данные рис. 4 подтверждают квадратичную зависимость тока от давления.

Сравнение ВАХ, измеренных в воздухе и гелии

На рис. 5, 6 показаны ВАХ, измеренные при работе ГЭП с разными материалами изоляции и размерами в воздухе при давлениях от 0.1 до 0.33 kPa и в гелии при давлениях от 0.5 до 3 kPa с различным содержанием воздуха. Видно, что при работе в воздухе плотность тока значительно выше, нежели при работе в гелии, что соответствует разнице в нормальной плотности тока [4].

Зависимость ВАХ от содержания примеси воздуха в гелии показана на рис. 6. Заполненная атмосферным воздухом вакуумная камера откачивалась до некоторого

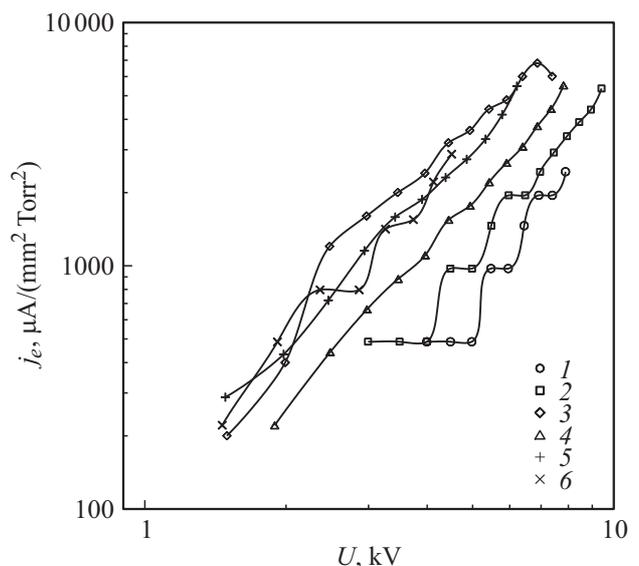


Рис. 4. Зависимости приведенной плотности тока ГЭП j_e от напряжения на катоде, катод из молибдена, конструкция с размерами $H = 2$ mm, $d = 0.5$ mm, $D = 3$ mm (P_{air} , Pa: 1 — 100, 2 — 133, 3 — 150, 4 — 200, 5 — 250, 6 — 400).

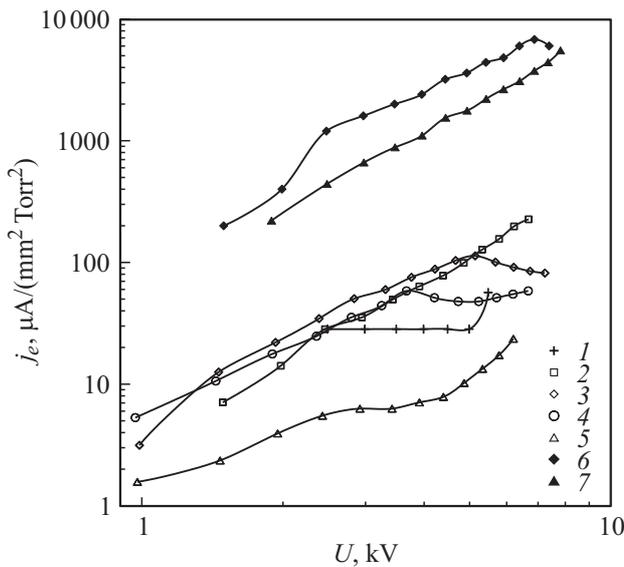


Рис. 5. Зависимости приведенной плотности тока ГЭП j_e от напряжения на катоде, конструкция из керамики КСП-90 с размерами $H = 2$ mm, $d = 0.5$ mm, $D = 3$ mm ($1 - P_{\text{He}} = 0.5$ kPa, содержание воздуха 2.05%; $2 - P_{\text{He}} = 1$ kPa, содержание воздуха 1%; $3 - P_{\text{He}} = 1.5$ kPa, содержание воздуха 0.7%; $4 - P_{\text{He}} = 2$ kPa, содержание воздуха 0.1%; $5 - P_{\text{He}} = 3$ kPa, содержание воздуха 0.04%; $6 - P_{\text{air}} = 0.150$ kPa; $7 - P_{\text{air}} = 0.2$ kPa).

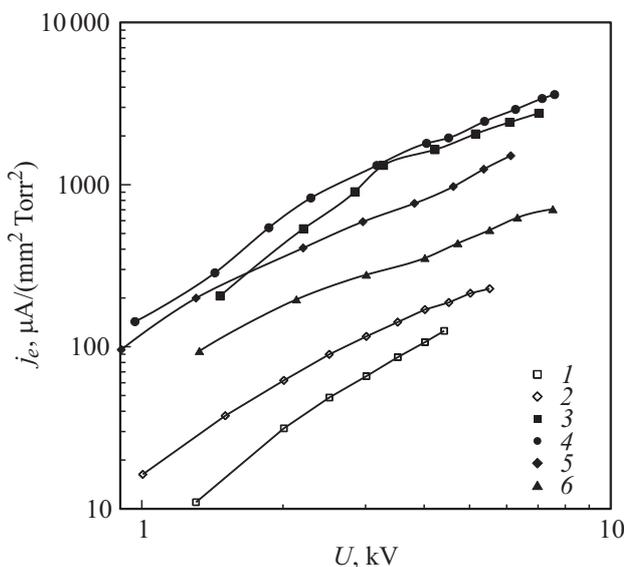


Рис. 6. Зависимости приведенной плотности тока ГЭП j_e от напряжения на катоде, конструкция из БП-10 с размерами $H = 1.5$ mm, $d = 2.34$ mm, $D = 3.5$ mm (P_{He} , kPa: $1 - 0.5$, $2 - 0.51$) и $H = 2$ mm, $d = 2.34$ mm, $D = 3.5$ mm (P_{air} , kPa: $3 - 0.1$, $4 - 0.12$, $5 - 0.23$, $6 - 0.33$).

малога давления, а затем заполнялась гелием до давления 2 kPa. Объемное содержание воздуха для каждой кривой приведено в подписи к рисунку.

Кривые 1–3 имеют характерный максимум при напряжении 3–6 kV. Положение максимума зависит от

примеси воздуха. Как данные рис. 7, так и многие другие эксперименты показывают, что с ростом содержания воздуха растет и напряжение, при котором ВАХ имеет максимум. При этом величина тока резко увеличивается с ростом содержания воздуха более $\sim 10\%$. При снижении содержания воздуха менее $\sim 0.1\%$ токи в несколько раз уменьшаются, стремясь к некоторому предельному значению, которого, однако, в наших экспериментах достигнуть не удалось (минимальное реализованное содержание воздуха составило 0.04%). Интересно отметить, что в диапазоне доли воздуха от 0.1 до 10% токи слабо зависят от содержания воздуха, причем с ростом примеси токи могут как увеличиваться, так и уменьшаться.

Поскольку гелий имеет высокий потенциал ионизации, сечение нерезонансной перезарядки ионов гелия на молекулах других газов может быть весьма велико, из-за чего разряд в гелии чувствителен даже к малому содержанию примесей [5]. Кроме того, наличие у гелия метастабильных уровней с достаточно высокой энергией обеспечивает относительно высокую вероятность ионизации молекул примеси вследствие эффекта Пеннинга.

В результате при наличии примеси воздуха в гелии в направлении катода будет двигаться избыточное (по сравнению с парциальной долей примеси) количество ионов азота и кислорода. Это приведет к увеличению коэффициента эмиссии. Однако с ростом тока разряда значительная часть молекул примеси из разрядного промежутка будет вовлечена в движение к катоду, что приведет к снижению доли бомбардирующих катод примесных ионов, которая при достаточно больших токах сравняется с парциальной долей примеси. Такой эффект должен привести к появлению максимума на

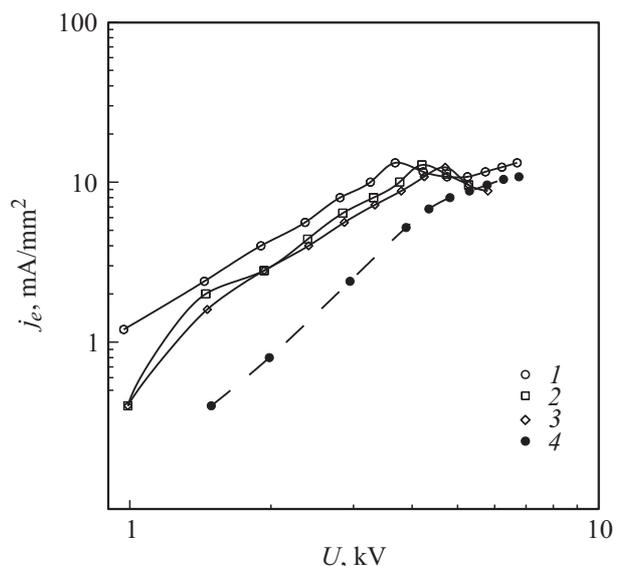


Рис. 7. Зависимость плотности тока ГЭП j_e от напряжения на катоде, $P_{\text{He}} = 2$ kPa, катод из молибдена, конструкция с размерами $H = 2$ mm, $d = 0.5$ mm, $D = 3$ mm (содержание воздуха, %: $1 - 0.2$, $2 - 2.25$, $3 - 5$, $4 - 0.2$).

ВАХ, причем при больших токах ВАХ будет стремиться к ВАХ разряда в идеально чистом гелии.

После измерения ВАХ, представленной на рис. 6 кривой 1, ГЭП был выключен. Через небольшое время, необходимое для охлаждения ГЭП, измерения были выполнены повторно. Результаты представлены на рис. 7 кривой 4. Эта ВАХ не имеет выраженного максимума, однако угол наклона кривой меняется при напряжении около 5 kV. Так как результаты представлены в логарифмических координатах, изменение угла наклона означает изменение степени, если аппроксимировать данные степенной зависимостью.

Механизмы эмиссии электронов в результате бомбардировки катода ионами и образовавшимися при перезарядке быстрыми нейтральными частицами являлись предметом многочисленных исследований, хороший обзор которых содержится в [6]. Результаты исследований показывают, что загрязнение поверхности катода пленками газа или другими атомами приводит к значительному увеличению коэффициента эмиссии независимо от рода пленки. Весьма эффективными являются оксидные пленки, поэтому во многих работах в рабочий газ специально добавляли примесь кислорода.

Как отмечено выше, перезарядка ионов гелия на молекулах воздуха может приводить к избыточному содержанию ионов кислорода в бомбардирующих катод частицах. Следствием этого может быть восстановление оксидной пленки на поверхности катода. Уменьшение доли кислорода с ростом тока может привести к разрушению пленки ионами и атомами гелия и снижению коэффициента эмиссии. Вероятно, в условиях эксперимента (давление 2 кПа, примесь воздуха 0.2%, т. е. содержание кислорода 0.04%) количество примеси кислорода было достаточно для поддержания существующей оксидной пленки при измерении кривой 1, но недостаточно для ее восстановления при измерении кривой 4 после очистки катода бомбардировкой гелием при высоких напряжениях в первом эксперименте. Подобные эффекты наблюдались неоднократно при различных давлениях и парциальных долях воздуха.

Заключение

Проведенные работы по исследованию ВАХ показали, что функционирование ГЭП практически не зависит от толщины разрядного промежутка. При достаточно больших диаметрах разрядной ячейки плотность тока практически не зависит от диаметра, однако экстраполяция имеющихся данных позволяет предположить, что при малых диаметрах поддержание самостоятельного разряда невозможно. Для условий проведенных экспериментов (воздух с давлением 133 Па, толщина изолятора 1.5 mm) по результатам экстраполяции минимальный возможный диаметр составляет ~ 0.3 mm, что косвенно подтверждается размерами области эрозии ка-

тода, составившими ~ 0.2 mm при диаметре разрядного промежутка 0.5 mm.

Проведенные эксперименты подтвердили выводы других авторов о значительном влиянии малой примеси воздуха на разряд в гелии, особенно при низких напряжениях. При этом отмечено существенное влияние предшествовавшего функционирования катода на ВАХ разряда.

Помимо накачки газовых лазеров результаты данного исследования могут использоваться при создании источников света нового поколения [7] и в электронно-лучевой обработке материалов [8]. Необходимо отметить, что авторы [7] исследовали работу открытого разряда в различных инертных газах (гелий, аргон), тогда как рабочей средой в [8] являлся остаточный воздух с продуктами испарения обрабатываемых материалов. В связи с этим представляет значительный интерес продолжение исследований разряда в различных газах с целью анализа общих принципов генерации пучков электронов в устройствах на основе открытого разряда.

В настоящее время к публикации готовятся результаты измерений КПД генерации пучков электронов, выполненных калориметрическим методом, и математическая модель, предложенная для описания работы ГЭП.

Список литературы

- [1] Бобров В.А., Войтешонок В.С., Головин А.И. и др. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 121–126.
- [2] Бохан П.А., Сорокин А.Р. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 88–95.
- [3] Азаров А.В., Митько С.В., Очкин В.Н. и др. // XXVII Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и УТС. 2010.
- [4] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Изд. дом Интеллект, 2009.
- [5] Богданов Е.А., Капустин К.Д., Кудрявцев А.А. и др. // XXXVII Междунар. (Звенигородская) конф. по физике плазмы и УТС. 2010.
- [6] Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [7] Муратов Е.А., Рахимов А.Т., Суетин Н.В. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 121–124.
- [8] Бурдовицин В.А., Климов А.С., Окс Е.М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 11. С. 61–66.