

ФОРМИРОВАНИЕ АНОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРОННОМ ДИОДЕ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

© 2023 г. А. И. Пушкарев^{а,*}, С. С. Полисадов^а

^аТомский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

*e-mail: aipush@mail.ru

Поступила в редакцию 21.07.2022 г.

После доработки 21.07.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

Представлены результаты исследования планарного вакуумного диода со взрывоэмиссионным катодом в процессе генерации импульсного электронного пучка (250–400 кэВ, 100 нс, 150 Дж в импульсе). Выполнено моделирование формирования анодной плазмы при электронно-стимулированной десорбции молекул и ударной ионизации в анодном газовом слое. Суммарный заряд электронов анодной плазмы составил $\approx 10\%$ от заряда электронного пучка и соответствует расчетным при сечении электронно-стимулированной десорбции $(0.5\text{--}2) \cdot 10^{-14}$ см². Полученные значения превышают данные других исследователей вследствие учета вклада ионизации адсорбированных молекул в их десорбцию. Показано, что термическая десорбция молекул с поверхности анода и электронная дегазация материала анода вносят незначительный вклад в формирование анодного газового слоя.

DOI: 10.31857/S0032816223010202, EDN: PVRUML

1. ВВЕДЕНИЕ

Сильноточные импульсные электронные пучки широко используются для накачки газовых лазеров и генерации СВЧ-излучения [1, 2], иницирования неравновесных плазмохимических процессов [3], обработки металлических изделий [4], стерилизации продуктов, медицинских изделий [5] и др. Генерация импульсного электронного пучка сопровождается образованием анодной плазмы в зазоре анод–катод диода [6, 7]. Анодная плазма является одним из основных факторов, ограничивающих длительность импульса электронного тока [8] и СВЧ-излучения, генерируемого релятивистским магнетроном [9]. Электронный ток может существенно превышать величину, определяемую одномерным соотношением Чайлда–Ленгмюра [10], из-за сокращения зазора анод–катод анодной плазмой, дополнительного тока электронов и ионов анодной плазмы и дополнительной компенсации объемного заряда электронов в прикатодной области ионами из анодной плазмы. Эти процессы затрудняют моделирование генерации сильноточных электронных пучков и оптимизацию режима работы диода.

Анодная плазма в электронном диоде формируется при ионизации молекул в анодном газовом слое. При большой энергии электронов газ в зазоре анод–катод вакуумного диода образуется за

счет следующих процессов: термической и электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) молекул с поверхности анода, электронной дегазации материала анода и катода.

Многочисленные исследования показали, что ЭСД газовых молекул с металлической поверхности имеет сечение от 10^{-19} до 10^{-17} см² [11–13], что при поверхностной плотности молекул $\approx 10^{16}$ см⁻² соответствует десорбции менее 0.1 молекулы/электрон. Для молекул кислорода с поверхности Ti-мишени при температуре 300 К и энергии электронов 300 эВ сечение ЭСД составляет 10^{-19} – 10^{-18} см² [14]; для молекул метанола с поверхности Al-мишени при облучении электронами с энергией 3 кэВ – примерно $2 \cdot 10^{-17}$ см² [15]; для молекул СО с Pt-мишени при энергии электронов 1.5 кэВ – примерно $5 \cdot 10^{-18}$ см² [16]; для молекул ксенона с Pt- и Ni-мишеней при энергии электронов 1–3 кэВ – примерно $1 \cdot 10^{-17}$ см² [17].

Вклад в образование анодной плазмы при большой энергии электронов может дать дегазация материала анода. Линейные потери энергии электрона с энергией 0.1 МэВ в меди составляют 24.3 МэВ/см [18], экстраполированный пробег электронов равен ≈ 40 мкм. Экспериментальные исследования показали, что при работе электронного диода с катодом из углеродного волокна (carbon fiber cathode) дегазация составляет от

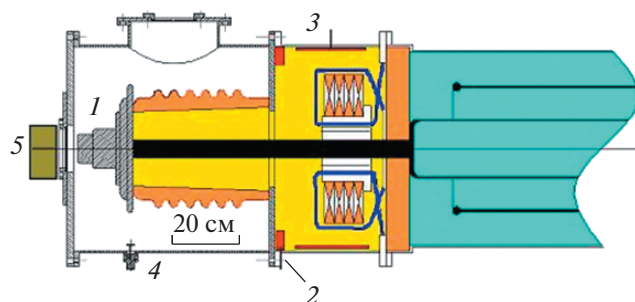


Рис. 1. Схема диодного узла [7]. 1 – катод, 2 – пояс Роговского, 3 – емкостный делитель напряжения, 4 – дифференциальный делитель напряжения, 5 – цилиндр Фарадея.

0.73 [19] до 9 молекул/электрон [20]. При использовании катода с покрытием из углеродных нанотрубок дегазация составила 3.5 молекулы/электрон и незначительно менялась при изменении энергии электронов от 0.1 до 0.35 МэВ [21]. При большой плотности электронного тока значительный вклад в формирование анодного газового слоя может дать термическая десорбция при нагреве анода, что широко используется для ускорения получения сверхвысокого вакуума.

Цель выполненной работы – определение доминирующего процесса формирования анодной плазмы в электронном диоде со взрывоэмиссионным катодом при его работе в техническом вакууме (5–10 мПа).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Исследования выполнены на ускорителе ТЭУ-500 (250–400 кВ, 80 нс) [7]. На рис. 1 показан диодный узел ускорителя и расположение диагностического оборудования. Мы использовали диод с плоским цилиндрическим катодом диаметром 45 и 60 мм, выполненным из графита, или с покрытием из углеродной ткани, зазор анод–катод изменяли от 9 до 14 мм.

Ускоряющее напряжение измеряли емкостным делителем, расположенным в маслonaполненной камере, и дифференциальным делителем напряжения, расположенным в диодной камере [7]. Для измерения полного тока в диодном узле использовали пояс Роговского с обратным витком. Ток электронного пучка измеряли цилиндром Фарадея (ЦФ), который откачивали вместе с диодной камерой до давления 5–10 мПа. Осциллограммы усредняли по 10-ти импульсам, следующим с частотой 0.5 импульса/с, после тренировки катода в течение 5–10 импульсов. На рис. 2 показаны осциллограммы ускоряющего напряжения и электронного тока (использовался катод с покрытием из углеродной ткани, диаметр катода 60 мм, зазор анод–катод 13 мм). Приведе-

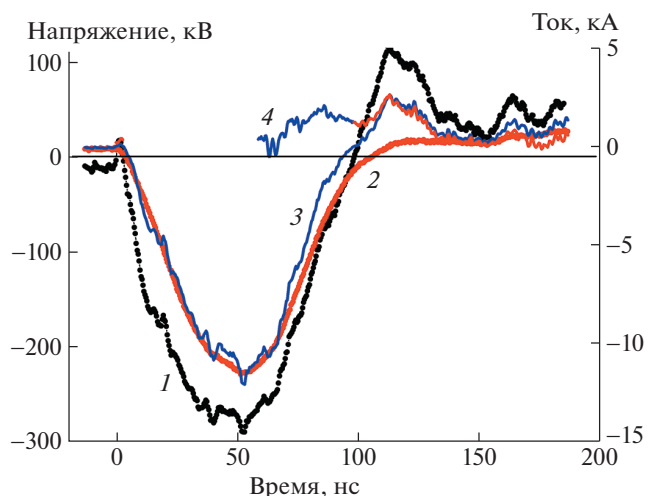


Рис. 2. Осциллограммы ускоряющего напряжения (1) и тока электронного пучка (2). Кривая 3 – расчетный электронный ток, 4 – дополнительный ток.

на также расчетная кривая электронного тока (см. ниже). Калибровка показала, что диагностическое оборудование ускорителя корректно отражает его работу на резистивную нагрузку и при генерации электронного пучка [7].

3. ИССЛЕДОВАНИЕ БАЛАНСА ТОКА В ДИОДЕ

В первой серии экспериментов мы использовали в качестве анода плоский медный коллектор ЦФ диаметром 92 мм. На рис. 3 показано изменение токов в диоде в течение генерации электронного пучка (использовался катод с покрытием из углеродной ткани диаметром 60 мм, зазор анод–катод 12 мм). В начале импульса, при $t < \approx 85$ нс, электронный ток совпадает с полным током в диодном узле, что указывает на отсутствие потерь. Далее, при $85 < t < \approx 100$ нс ток электронного пучка превышает полный ток в диоде. После изменения полярности ускоряющего напряжения ($100 < t < 140$ нс) полный ток превышает ток электронного пучка; в дальнейшем оба тока совпадают.

Изменение зазора анод–катод, диаметра и материала катода позволило в широких пределах варьировать режим работы диода и проследить зависимость дополнительного тока от тока электронного пучка. На рис. 4 показаны сводные экспериментальные данные по зависимости дополнительного заряда от заряда электронного пучка для диода с катодом диаметром 45 и 60 мм при зазоре анод–катод 9–14 мм. Расчет дополнительного заряда $Q_{\text{доп1}}$, Кл, выполнен с использованием соотношения:

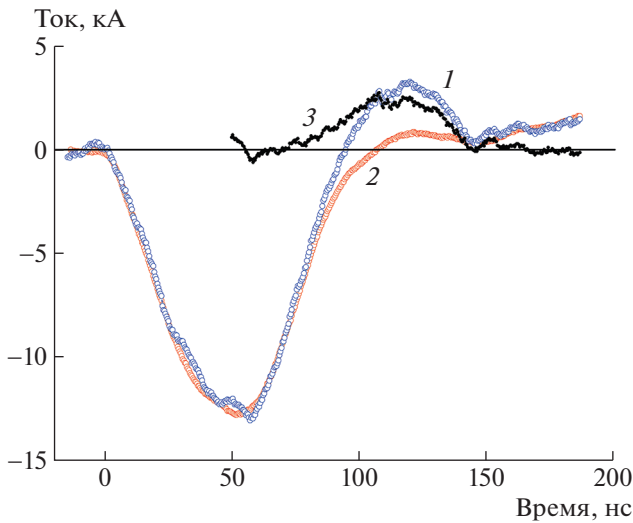


Рис. 3. Осциллограммы полного тока в диоде (1) и тока электронного пучка (2). Кривая 3 – дополнительный ток.

$$Q_{\text{допн}} = \int_0^{\tau} |I_{\text{д}} - I_e| dt, \quad (1)$$

где τ – длительность импульса; $I_{\text{д}}$, А – полный ток в диоде; I_e , А – ток электронного пучка.

В следующей серии экспериментов в качестве анода использовали плоскую металлическую решетку диаметром 100 мм с прорезями шириной 6 мм; ее прозрачность 70%. Электронный ток регистрировали ЦФ, установленным за анодной решеткой на расстоянии 5 мм, ток корректировали на оптическую прозрачность решетки. На рис. 5 показано изменение токов в диоде в течение генерации электронного пучка. Использовался катод с покрытием из углеродной ткани, диаметр катода 60 мм, зазор анод–катод 12 мм.

При изменении схемы регистрации электронного тока расхождение между током электронного пучка и полным током в диоде наблюдается только после изменения полярности ускоряющего напряжения, при $t > \approx 90$ нс.

4. РАСЧЕТ ТОКА В ДИОДЕ

Электронный ток, генерируемый вакуумным диодом, ограничивается эмиссионной способностью катода или объемным зарядом электронов в зазоре анод–катод [1, 7]. Плотность электронного тока в режиме ограничения объемным зарядом электронов описывается одномерным соотношением Чайлда–Ленгмюра [10]. Для диода со взрывоэмиссионным катодом необходимо учитывать расширение плазменного слоя на поверхности катода, ток диода $I_{\text{расч1}}(t)$, А, равен [7]:

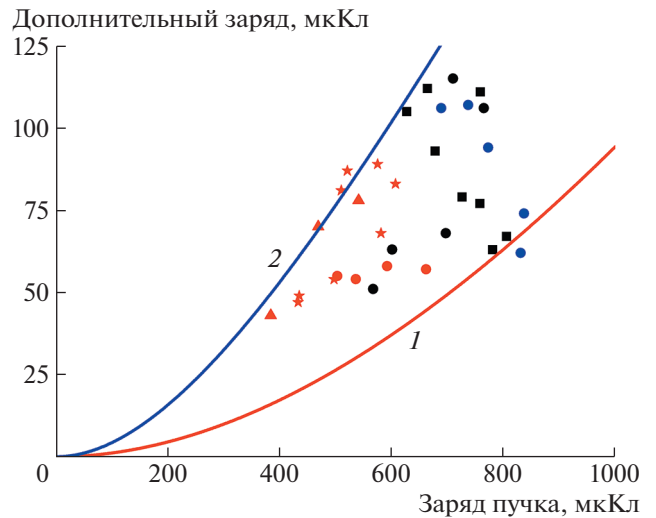


Рис. 4. Зависимость дополнительного заряда от заряда электронного пучка: точки – сводные экспериментальные значения; кривые 1, 2 – расчет по соотношению (14) при сечении ЭСД $0.5 \cdot 10^{-14}$ см² (1) и $2 \cdot 10^{-14}$ см² (2).

$$I_{\text{расч1}}(t) = \frac{4\epsilon_0 \sqrt{2e} S_{\text{к}}(t) U^{3/2}}{9\sqrt{m_e} d(t)^2} = 2.33 \cdot 10^{-6} F U^{3/2} \frac{\pi(r_0 + v_{\text{взр}}t)^2}{(d_{\text{а-к}} - v_{\text{взр}}t)^2}, \quad (2)$$

где $S_{\text{к}}$, см² – площадь катода; U , В – ускоряющее напряжение; ϵ_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; r_0 , см – радиус катода; $d_{\text{а-к}}$, см – начальный зазор анод–катод; m_e – масса электрона; e , Кл – заряд электрона; $v_{\text{взр}}$, м/с – скорость

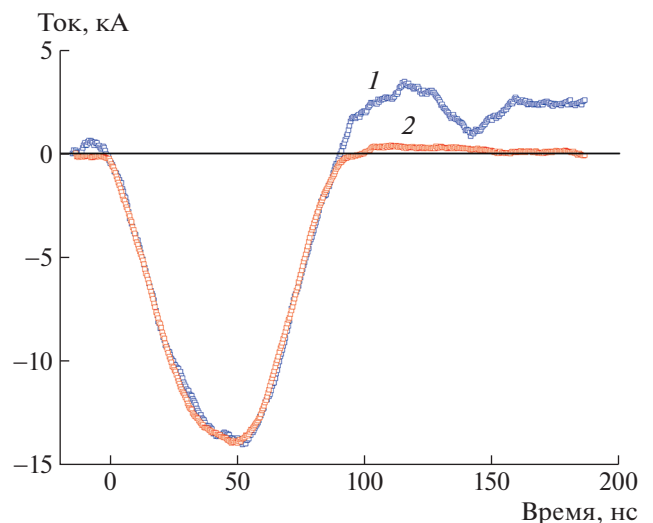


Рис. 5. Осциллограммы полного тока в диоде (1) и тока электронного пучка (2).

расширения взрывоэмиссионной плазмы; F – форм-фактор.

На рис. 2 приведены рассчитанные по соотношению (2) значения электронного тока. При расчете тока $I_{\text{расч2}}(t)$, А, после изменения полярности ускоряющего напряжения ($t > 90$ нс) учитывали эффект эрозии плазмы в зазоре анод–катод [7, 22], расчет выполняли по соотношению:

$$I_{\text{расч2}} = 2.33 \cdot 10^{-6} F U^{3/2} \frac{\pi [r_0 + v_{\text{взр}}(t - t_0)]^2}{[d_{\text{а-к}} - v_{\text{взр}}(t - t_0)]^2}, \quad (3)$$

где t_0 – время изменения полярности ускоряющего напряжения, $t_0 \approx 90$ нс на рис. 2.

Электронный ток диода в начале импульса, при $t < \approx 70$ нс, хорошо описывается соотношением (2), учитывающим расширение взрывоэмиссионной плазмы с постоянной скоростью, равной 2 ± 0.1 см/мкс. Скорость разлета взрывоэмиссионной графитовой плазмы близка к величине, полученной при статическом пробое вакуумных промежутков с графитовыми электродами (2 см/мкс) [6]. Ток диода с катодом из углеродной ткани удовлетворительно описывается соотношением (2) при введении форм-фактора $F = 1.7 \pm 0.05$, который учитывает наличие микронеровностей на поверхности катода. Значение форм-фактора было постоянным при изменении зазора анод–катод от 9 до 14 мм и диаметре катода из углеродной ткани 45 и 60 мм [7].

При $80 < t < \approx 100$ нс ток электронного пучка превышает расчетные значения. После изменения полярности ускоряющего напряжения ($100 < t < 150$ нс) расчетный ток превышает ток электронного пучка. В дальнейшем оба тока совпадают. На рис. 4 показаны сводные экспериментальные значения дополнительного заряда для диода с катодом диаметром 45 и 60 мм при зазоре анод–катод 9–14 мм, расчет дополнительного заряда $Q_{\text{доп2}}$, Кл, выполнен по соотношению:

$$Q_{\text{доп2}} = \int_0^{\tau} |I_{\text{расч}} - I_e| dt. \quad (4)$$

5. РАСЧЕТ СУММАРНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНОВ АНОДНОЙ ПЛАЗМЫ

При использовании коллектора ЦФ в качестве анода ток электронного пучка в конце импульса не совпадает с полным током в диоде, дополнительный заряд составляет $\approx 10\%$ от заряда электронного пучка (см. рис. 4). Вероятная причина отклонения электронного тока от полного тока в диоде и от расчетных значений – вклад дополнительных электронов (дополнительно к электронам, которые эмитируются из катодной плазмы) в зазоре анод–катод. Источником дополнительных электронов может быть анодная плазма.

Суммарный заряд электронов в анодной плазме можно рассчитать из линейных потерь энергии (ЛПЭ) ускоренных электронов, так как при их энергии менее 1 МэВ основной вклад в поглощение в мишени дают ионизационные процессы [23]. Расчет суммарного заряда по сечению ударной ионизации затруднен из-за отсутствия достоверных значений сечения ионизации при энергии электронов более 5 кэВ [24].

Суммарный заряд электронов в анодной плазме равен суммарному заряду ионов, образуемых в анодном газовом слое при ударной ионизации электронами, эмитированными из катодной плазмы и ускоренными в зазоре анод–катод. Заряд равен двойному интегралу произведения количества ионов, образуемых одним электроном на единичном пути в анодном газовом слое, на количество электронов, генерируемых в единицу времени, при интегрировании по длительности импульса электронного тока и по зазору анод–катод:

$$Q_{\text{расч}} = e \int_0^{d_{\text{а-к}}} \int_0^{\tau} N(E) \frac{I_e(t)}{e} dx dt = \int_0^{d_{\text{а-к}}} \int_0^{\tau} N(E) I_e(t) dx dt. \quad (5)$$

Количество ионов $N(E)$, см $^{-1}$, которые образуются одним электроном с энергией E на единичном пути в зазоре анод–катод, равно:

$$N(E) = \frac{1}{E_{\text{ион}}} \frac{dE}{dx}, \quad (6)$$

где dE/dx , эВ/см – ЛПЭ ускоренных электронов; $E_{\text{ион}}$, эВ – энергия ударной ионизации молекулы.

В наших экспериментах состав остаточного газа в диодной камере и адсорбированных молекул соответствует составу воздуха, поэтому при расчетах принимали $E_{\text{ион}} = 15$ эВ с учетом энергии ионизации молекул N_2 (15.6 эВ) и O_2 (12.1 эВ) [25, 26] и их парциальных давлений в воздухе.

ЛПЭ рассчитывали по программе ESTAR [18] по данным NIST. Потери энергии в ESTAR рассчитаны для концентрации молекул $n_0 = 2.7 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$. Диссоциация молекул и ударная ионизация атомов происходят в результате бинарных столкновений, поэтому ЛПЭ пропорциональны концентрации молекул. Тогда количество ионов, которые образуются одним электроном с энергией E на единичном пути в газовом слое с концентрацией молекул $n_{\text{газ}}(t)$, равно:

$$N(E) = \frac{n_{\text{газ}}(t)}{n_0 E_{\text{ион}}} \frac{dE}{dx}. \quad (7)$$

Анодный газовый слой при электронно-стимулированной десорбции молекул расширяется со скоростью ≈ 0.17 см/мкс [27], и его толщина в течение генерации электронного пучка (≈ 100 нс) будет менее 0.2 мм при зазоре анод–катод 12 мм. Поэтому энергия электронов в анодном газовом

слое превышает 100 кэВ при ускоряющем напряжении 300–500 кВ. Анализ энергетического спектра электронов, генерируемых ускорителем ТЭУ-500, показал, что 80% электронов имеют энергию более 200 кэВ [28]. При энергии электронов более 100 кэВ ЛПЭ не превышают 5 кэВ/см и изменяются незначительно [24], поэтому изменением величины ЛПЭ в анодном газовом слое и в течение генерации пучка в соотношении (5) можно пренебречь:

$$Q_{\text{расч}} = \frac{n_{\text{газ}}(t)d_{\text{а-к}}}{n_0 E_{\text{ион}}} \frac{dE}{dx} \int_0^{\tau} I_e(t) dt = \frac{n_{\text{газ}}(t)d_{\text{а-к}} Q_e}{n_0 E_{\text{ион}}} \frac{dE}{dx}, \quad (8)$$

где Q_e , Кл – заряд электронного пучка.

Концентрация молекул в анодном газовом слое значительно превышает концентрацию молекул в остальном объеме зазора анод–катод, поэтому формирование анодной плазмы идет в основном в анодном газовом слое толщиной $d_{\text{ан}}$. В этом случае в соотношении (8) $n_{\text{газ}}d_{\text{а-к}} \approx n_{\text{газ}}d_{\text{ан}} = n_{s0} - n_s(t)$, где $n_s(t)$, см^{-2} – поверхностная плотность адсорбированных молекул на аноде; n_{s0} – начальная поверхностная плотность адсорбированных молекул. Тогда суммарный заряд ионов, которые образуются в анодном газовом слое, равен:

$$Q_{\text{расч}}(t) = \frac{[n_{s0} - n_s(t)]Q_e}{n_0 E_{\text{ион}}} \frac{dE}{dx}. \quad (9)$$

Скорость уменьшения поверхностной плотности адсорбированных молекул на аноде при ЭСД равна [29]:

$$\frac{dn_s(t)}{dt} [\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] = -\sigma_{\text{дес}} \phi_e(t) n_s(t), \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{дес}}$, см^2 – сечение ЭСД; $\phi_e(t)$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ – мощность потока электронов на поверхности анода.

Исследования распределения плотности энергии электронного пучка в поперечном сечении с помощью дозиметрической пленки показали, что плотность энергии на выходе планарного диода ускорителя ТЭУ-500 меняется незначительно [30]. Тогда средняя (по рабочей площади анода) мощность потока электронов будет равна:

$$\phi_e(t) = \frac{I_e(t)}{S_{\text{ан}} e}, \quad (11)$$

где $S_{\text{ан}}$, см^2 – рабочая площадь анода.

С учетом выражения (11) скорость уменьшения поверхностной плотности адсорбированных молекул на аноде при ЭСД будет равна:

$$\frac{dn_s(t)}{dt} = -\frac{\sigma_{\text{дес}} I_e(t) n_s(t)}{S_{\text{ан}} e}. \quad (12)$$

После преобразования выражения (12) и интегрирования получим:

$$n_s(t) = n_{s0} \exp\left(-\frac{\sigma_{\text{дес}} Q_e}{S_{\text{ан}} e}\right). \quad (13)$$

Из соотношений (9) и (13) получим, что суммарный заряд электронов в анодной плазме будет равен:

$$Q_{\text{расч}} = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_{\text{дес}} Q_e}{S_{\text{ан}} e}\right)\right] \frac{n_{s0} Q_e}{n_0 E_{\text{ион}}} \frac{dE}{dx}. \quad (14)$$

Результат расчета суммарного заряда электронов в анодной плазме по соотношению (14) показан на рис. 4 при $n_{s0} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $E_{\text{ион}} = 15 \text{ эВ}$, площади анода 66 см^2 , ЛПЭ, равных 5 кэВ/см , и для разных сечений ЭСД.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Образование анодной плазмы в зазоре анод–катод вакуумного диода хорошо объясняет расхождение измеренных и расчетных значений тока электронного пучка, а также полного тока в диоде. При использовании в качестве анода коллектора ЦФ электроны анодной плазмы, формируемой около его поверхности, вытягиваются электрическим полем к коллектору ЦФ и формируют дополнительный ток. При изменении полярности ускоряющего напряжения электроны анодной плазмы ускоряются в направлении от коллектора ЦФ. Ток, регистрируемый при этом поясом Роговского, превышает ток, регистрируемый ЦФ. Рост дополнительного заряда с увеличением заряда электронного пучка подтверждает этот вывод, см. рис. 4.

При использовании в качестве анода решетки, электрически соединенной с корпусом ускорителя, число электронов анодной плазмы, формируемой на поверхности анода, мало (прозрачность решетки 70%). Для электронов плазмы, формируемой на поверхности коллектора ЦФ в этом случае, электрическое поле направлено от анодной решетки к коллектору ЦФ (из-за падения напряжения на сопротивлении шунта ЦФ), что вызывает их движение от коллектора ЦФ к решетке, электрически соединенной с корпусом ускорителя.

Выполненные исследования показали, что экспериментальные значения суммарного заряда электронов анодной плазмы соответствуют расчетным при сечении электронно-стимулированной десорбции молекул $(0.5-2) \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ (50–200 молекул/электрон при поверхностной плотности молекул $\approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$), что существенно превышает данные других исследователей ($10^{-19}-10^{-17} \text{ см}^2$). Дополнительный вклад в образование анодной плазмы при большой энергии электронов может дать процесс дегазации материала анода. Однако экспериментальные исследования показали, что при использовании катода из углеродного волокна дегазация не превышает 10 молекул/электрон

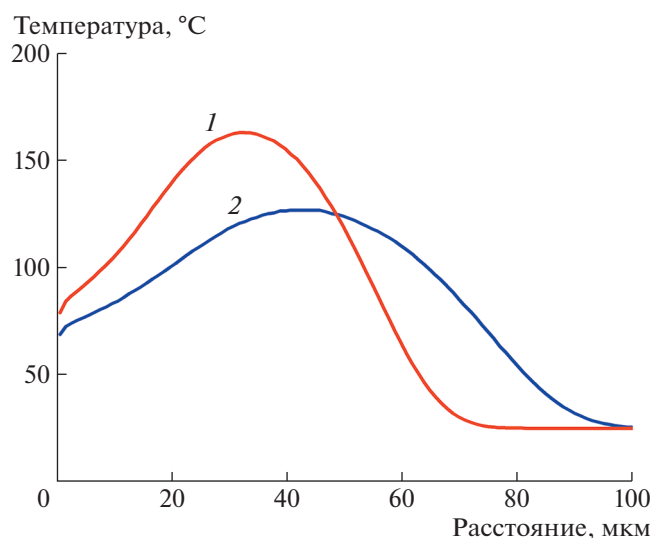


Рис. 6. Распределение температуры по глубине медного анода при облучении моноэнергетичным пучком с энергией электронов 250 кэВ (1) и 300 кэВ (2).

[19–21]. Кроме того, количество молекул при дегазации определялось из разности давления в камере до и после импульса электронного пучка. Увеличение давления при этом может быть связано с дегазацией материала катода и анода. Дегазация материала анода в наших экспериментах дает незначительный вклад в формирование анодного газового слоя.

При высокой плотности электронного тока значительный вклад в формирование анодного газового слоя может дать термическая десорбция при нагреве анода. При теплоте сорбции 0.1 эВ продолжительность сорбции при комнатной температуре составляет ≈ 0.1 нс [31]. При энергии электронного пучка 150 Дж и площади анода 66 см² средняя плотность энергии составит 2.3 Дж/см². На рис. 6 показано распределение температуры по глубине медного анода при облучении моноэнергетичным пучком с плотностью энергии 2.3 Дж/см². Расчет температуры $T_a(x)$ в градусах Цельсия выполнен по соотношению:

$$T_a(x) = T_0 + \frac{D(x)}{c_v}, \quad (15)$$

где T_0 , °C — начальная температура анода; $D(x)$, Дж/г — поглощенная доза на глубине x ; c_v , Дж/(г · К) — удельная теплоемкость материала анода.

Расчет распределения поглощенной дозы по глубине был выполнен по программе Geant4 [32, 33]. Тепловой фронт в течение импульса распространяется на расстояние $\lambda = (a\tau)^{0.5} \approx 3$ мкм (здесь $a = 1.1 \cdot 10^{-4}$ м²/с — температуропроводность меди), что значительно меньше пробега электронов

в аноде, см. рис. 6. Поэтому в течение генерации электронного пучка, с учетом вклада низкоэнергетических электронов, температура поверхности анода будет составлять 100–150 °C.

При неассоциативной термической десорбции число десорбированных молекул описывается уравнением Поляни–Вигнера первого порядка [33]:

$$n_s [\text{см}^{-2}] = n_{s0} \exp\left(-\frac{E_{\text{адс}}}{kT_a}\right), \quad (16)$$

где k , эВ/К — постоянная Больцмана; $E_{\text{адс}}$, эВ — теплота адсорбции; T_a , К — температура поверхности анода.

Теплота адсорбции газовых молекул составляет 0.1–0.2 эВ [31]. Теплота адсорбции N₂ на графите при температуре 300 К составляет ≈ 0.1 эВ [34, 35], и при нагреве анода до температуры 150 °C термодесорбция обеспечивает снижение поверхностной плотности молекул менее чем на 8%. Поэтому термодесорбция молекул с поверхности анода в наших экспериментах дает незначительный вклад в формирование анодного газового слоя.

В основе ЭСД лежит электронное возбуждение адсорбционной связи, соответствующее отталкивательному перераспределению электронной плотности между адсорбированной частицей и поверхностью [11]. Высокую эффективность ЭСД в наших экспериментах можно объяснить значительным вкладом ионизации адсорбированных молекул в их десорбцию. При энергии электронов 0.1–1 МэВ основной вклад в потери их энергии при поглощении в мишени дают ионизационные процессы [23]. При рекомбинации молекулярных ионов азота и кислорода выделяется 12–16 эВ энергии [24]. Теплота адсорбции N₂ на графите при температуре 300 К составляет ≈ 0.1 эВ [34, 35], и энергии, которая выделяется при рекомбинации, достаточно для десорбции 120–160 молекул.

Высокая эффективность ЭСД обеспечивает значительное уменьшение плотности адсорбированных молекул на поверхности анода в течение генерации электронного пучка, см. рис. 7.

Расчет плотности адсорбированных молекул выполнен по соотношению (13) при условии, что в течение генерации электронного пучка адсорбция молекул незначительна. Мощность потока молекул на анод ϕ_m , см⁻² · с⁻¹, равна [31]:

$$\phi_m = \frac{n_0 v_m}{4} = \frac{n_0}{4} \sqrt{\frac{3kT}{m_m}}, \quad (17)$$

где m_m — масса молекулы; v_m — ее средняя скорость.

При давлении 10 мПа концентрация молекул остаточного газа в диодной камере составляет

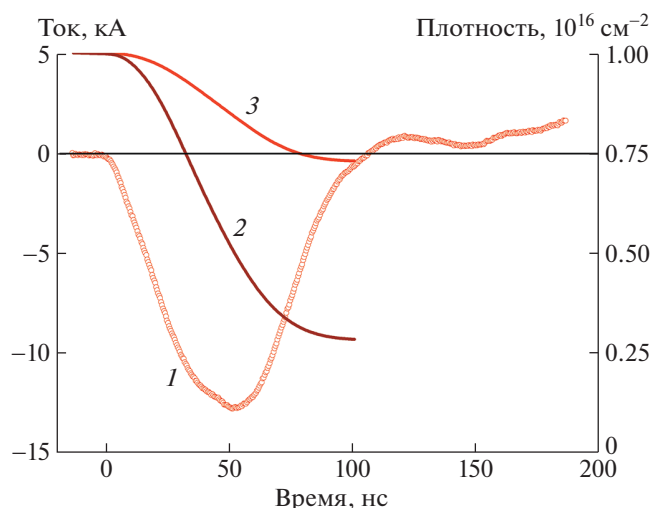


Рис. 7. Осциллограмма электронного тока (1) и изменение плотности адсорбированных молекул на аноде при сечении ЭСД $0.5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ (2) и $2 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ (3).

$2.7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При температуре 300 К средняя скорость молекул кислорода и азота равна $\approx 5 \cdot 10^4 \text{ см/с}$. Тогда плотность потока молекул на анод составит $\approx 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. В течение генерации электронного пучка поверхностная плотность адсорбированных молекул увеличится на $\approx 10^{10} \text{ см}^{-2}$, что значительно меньше убыви плотности адсорбированных молекул, см. рис. 7.

Мы усредняли осциллограммы ускоряющего напряжения и тока в диоде по 10-ти импульсам, следующим с частотой 0.5 импульса/с. При давлении в диодной камере 10 мПа для достижения поверхностной плотности $\approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$ потребуется $\approx 0.1 \text{ с}$. Поэтому усреднение осциллограмм по нескольким импульсам не вносит погрешности в результаты экспериментов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что в электронном диоде со взрывоэмиссионным катодом при работе в техническом вакууме (5–10 мПа) при ускоряющем напряжении 250–400 кВ основным источником газа, при ионизации которого образуется анодная плазма, является электронно-стимулированная десорбция молекул с поверхности анода. Электронная дегазация материала анода и термическая десорбция незначительны. ЭСД молекул в наших экспериментальных условиях (50–200 молекул/электрон) существенно превышает данные других исследователей (менее 0.1 молекулы/электрон), что можно объяснить значительным вкладом ионизации адсорбированных молекул в их десорбцию.

Заметное влияние анодной плазмы на работу планарного диода со взрывоэмиссионным катодом проявляется только через 70–80 нс после приложения ускоряющего напряжения. При этом дополнительный ток электронов анодной плазмы вносит наиболее существенный вклад в отклонение измеренных значений электронного тока диода от расчетных, а также в величину полного тока в диоде. Сокращение зазора анод–катод за счет расширения анодной плазмы не существенно, анодный газовый слой расширяется со скоростью $\approx 0.17 \text{ см/мкс}$, что значительно меньше скорости расширения взрывоэмиссионной плазмы ($2 \pm 0.1 \text{ см/мкс}$) [6, 7].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” ТПУ в рамках научного проекта Приоритет-2030-НИП/внеСП-064-1308-2022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Крендель Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Fan Y.W., Wang X.Y., Zhang Z.C., Xun T., Yang H.W. // Vacuum. 2016. V. 128. P. 39. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.03.006>
3. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
4. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом. Новосибирск: Наука, 2018.
5. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий. Екатеринбург: Изд-во Уральского ГАУ, 2017.
6. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
7. Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Сазонов Р.В., Холодная Г.Е. Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. М.: Физматлит, 2013.
8. Wang X.Y., Fan Y.W., Shi D., Shu T. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. 073103. <https://doi.org/10.1063/1.4956460>
9. Li A.K. and Fan Y.W. // J. Appl. Phys. 2016. V. 120. 065105. <https://doi.org/10.1063/1.4960699>
10. Langmuir I. // Phys. Rev. 1913. V. 2. P. 45.
11. Агеев В.Н., Бурмистрова О.П., Кузнецов Ю.А. // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 3. С. 389. <https://ufn.ru/ru/articles/1989/7/b/>
12. Madey T.E., Yates J.T. // Journal of Vacuum Science & Technology. 1971. V. 8. P. 525. <https://doi.org/10.1116/1.1315200>
13. Menzel D. // Topics Appl. Phys. 1975. V. 4. P. 101.

14. Dawson P.H. // Surface Science. 1977. V. 65. P. 41. [https://doi.org/10.1016/0039-6028\(77\)90291-6](https://doi.org/10.1016/0039-6028(77)90291-6)
15. Young C.E., Whitten J.E., Pellin M.J., Gruen D.M., Jones P.L. // In Desorption Induced by Electronic Transitions DIET IV. 1990. V. 19.
16. Lambert R.M., Comrie C.M. // Surf. Sci. 1976. V. 59. P. 33.
17. Baker B.G., Sexton B.A. // Surf. Sci. 1975. V. 52. P. 353.
18. Berger M., Coursey J., Zucker M., Chang J. NIST Standard Reference Database 124. 2017. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
19. Umstadtd R.J., Schlise C., Wang F. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2005. V. 33. Iss. 2. P. 901. <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.844593>
20. Li An-Kun, Fan Yu-Wei, Qian Bao-Liang, Zhang Zicheng, Tao Xun // Journal of Applied Physics. 2017. V. 122. 185901. <https://doi.org/10.1063/1.4996649>
21. Shiffler D., Zhou O., Bower C., LaCour M., Golby K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. P. 2152. <https://doi.org/10.1109/TPS.2004.835519>
22. Humphries S. Charged Particle Beams. NY.: Wiley, 1990.
23. Sigmund P. Particle Penetration and Radiation Effects. V. 2: Penetration of Atomic and Molecular Ions. Springer International Publishing, 2014.
24. https://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/atom_index.html
25. Mallard G., Linstrom P.J. // NIST Standard Reference Database. 2000. V. 69. <http://www.webbook.nist.gov>
26. Завилопуло А.Н., Чинев Ф.Ф., Шпеник О.Б. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 4. С. 19.
27. Пушкарев А.И., Полисадов С.С. // ЖТФ. 2022. Т. 92. Вып. 2. С. 232.
28. Pushkarev A., Prima A., Ezhov V., Miloichikova I., Petrenko E. // Laser and particle beams. 2021. P. 8815697, <https://doi.org/10.1155/2021/10.1155/2021/8815697>
29. Madey T.E., Stockbauer R. In Methods of Experimental Physics: V. 22 / Ed. by R.L. Park and M.G. Lagally. Academic Press Inc., 1985.
30. Пушкарев А.И., Прима А.И., Егорова Ю.И., Ежов В.В. // ПТЭ. 2020. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816220030143>
31. Бур Я. Динамический характер адсорбции. Пер. с англ. А.А. Лопаткина и др. / Под ред. В.М. Грязнова. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1962.
32. Collaboration G.E.A.N.T. Physics reference manual. Version: GEANT4. 2005.
33. Флад Э. Межфазная граница газ–твердое тело. Пер. с англ. А.А. Лопаткина и др. / Под ред. А.В. Киселева. М.: Изд-во Мир, 1970.
34. Byoung-Uk Choi, Dae-Ki Choi, Yong-Whan Lee, Byung Know Lee, Sung Hy tin Kim // J. Chem. Eng. Data. 2003. V. 48. P. 603.
35. Yongha Park, Dong-Kyu Moon, Yo-Nan Kim, Hyunwoong Ahn, Chang-Ha Lee // Adsorption. 2014. V. 20. P. 631.