

Влияние анодной и катодной плазмы на работу электронного диода со взрывоэмиссионным катодом

© А.И. Пушкарев, С.С. Полисадов

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: airpush@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2021 г.

В окончательной редакции 9 ноября 2021 г.

Принято к публикации 10 ноября 2021 г.

Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования формирования анодной и катодной плазмы в вакуумном диоде со взрывоэмиссионным катодом при генерации импульсного электронного пучка с плотностью тока $0.3\text{--}0.4\text{ кА/см}^2$, ускоряющем напряжении $300\text{--}500\text{ кВ}$ и длительности импульса 100 нс . Установлено, что концентрация анодной плазмы не превышает 10^{10} см^{-3} и она не вносит заметного вклада в работу диода и что формирование катодной газовой плазмы с концентрацией $\approx 10^{16}\text{ см}^{-3}$ обеспечивается полной десорбцией молекул с рабочей поверхности взрывоэмиссионного катода и высокой эффективностью ударной ионизации атомов. Показано, что заряд взрывоэмиссионного плазменного слоя значительно меньше заряда электронного пучка и основным источником электронов является не взрывоэмиссионная плазма, а катодная газовая плазма, при этом электронный ток ограничивается концентрацией катодной плазмы. Использование катода с развитой поверхностью (катод с покрытием из углеродной ткани) позволяет увеличить полный заряд электронного пучка более чем в 1.5 раза без изменения диаметра катода и анод-катодного зазора.

Ключевые слова: сильнооточный электронный пучок, взрывная эмиссия, концентрация плазмы, электронно-стимулированная десорбция.

DOI: 10.21883/JTF.2022.02.52012.234-21

Введение

Вакуумные диоды со взрывоэмиссионным катодом широко используются для формирования импульсных электронных пучков [1]. Многие исследователи отмечают существенный вклад адсорбированного газа в работу диода. В монографии Г.А. Месяца [2] показано, что давление остаточного газа и способ получения вакуума в камере влияют на стабильность токоотбора с катода. При переходе от безмасляного высокого вакуума к масляной откачке и повышении давления до 0.1 Па катоды работают стабильнее, ресурс их работы составляет более 10^6 включений. В монографии [3] и работах [4,5] представлены результаты исследования металло-керамического катода из оксидной нанокерамики, по объему которой равномерно распределены металлические частицы. Авторы предполагают, что возникновение катодной плазмы обусловлено развитием разряда в газе в приповерхностных микропорах между диэлектриком и металлом. Существенный вклад газовой выделенной в работу взрывоэмиссионных катодов с войлочным и бархатным покрытием при генерации электронных пучков с плотностью тока $20\text{--}30\text{ А/см}^2$ и при ускоряющем напряжении $300\text{--}400\text{ кВ}$ отмечается в работе [2].

Генерация электронного пучка с высокой плотностью тока сопровождается электронно-стимулированной десорбцией газа с анода, образованием анодной плазмы и ее распространением в анод-катодный (АС) зазор [2].

Анодная плазма является одним из основных факторов, ограничивающих длительность импульса электронного пучка, формируемого диодом со взрывоэмиссионным катодом [6]. В этих условиях полный ток диода может превышать определяемую одномерным соотношением Чайлда–Ленгмюра (ЧЛ) величину [7] из-за сокращения АС-зазора, из-за дополнительной компенсации объемного заряда электронов в прикатодной области ионами из анодной плазмы и других факторов. Соотношение этих процессов, влияющих на работу вакуумного диода со взрывоэмиссионным катодом, малоизучено. В статье [8] представлен анализ ВАХ планарного диода с графитовым катодом диаметром 5 см при приложении импульса напряжения (300 кВ , 100 нс). Показано, что при начальном АС-зазоре 6 мм полный ток диода удовлетворительно описывается ЧЛ с учетом сокращения АС-зазора расширяющейся с постоянной скоростью ($2.5\pm 0.1\text{ см/мкс}$) катодной плазмой. При уменьшении начального АС-зазора до 2.8 мм через 50 нс после приложения напряжения полный ток превышал расчетные значения, что авторы объясняют компенсацией объемного заряда ионами анодной плазмы.

В нашей работе [9] представлены результаты исследования влияния адсорбированного газа на работу диода со взрывоэмиссионным катодом при генерации сильнооточного электронного пучка ($300\text{--}500\text{ кВ}$, 80 нс). Влияние определяли по изменению скорости расширения катодной плазмы. Получено, что при разных АС-зазорах ско-

рость плазмы постоянна в течение генерации пучка, но различна для катодов из разных материалов. Для катодов разного диаметра из графита и углеродной ткани она составила $2 \pm 0.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$, для многоигольчатого вольфрамового катода — $3 \pm 0.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$, для медного сплошного и медного многоострийного катодов — $3.5 \pm 0.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$. Существенная зависимость скорости плазмы от материала катода показывает, что влияние адсорбированного газа на работу диода со взрывоэмиссионным катодом незначительно.

Важнейшим условием эффективной генерации электронного пучка в диоде с пассивным катодом является формирование плазмы на рабочей поверхности катода. В диоде со взрывоэмиссионным катодом формирование плазмы происходит за счет взрывной эмиссии электронов, которая формирует неоднородную структуру плазмы. На первом этапе происходит образование отдельных эмиссионных центров [2], минимальное расстояние между ними определяется эффектом экранирования электрического поля вокруг центра [10]. Радиус экранирования равен 5–6 мм при электронном токе от одного эмиссионного центра 90 А [11] и ускоряющем напряжении при формировании центров эмиссии 100–120 кВ. Средняя концентрация плазмы в эмиссионном центре за время от 5 до 20 нс после приложения напряжения падает с 10^{17} до $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ [12]. В работе [13] показано, что концентрация катодной плазмы в диоде с катодом из углеродной ткани (carbon fibre cathode) составляет $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. В работе [14] показано, что концентрация взрывоэмиссионной плазмы в прикатодной области составляет 10^{14} cm^{-3} , а затем спадает обратно пропорционально квадрату расстояния. Распределение концентрации взрывоэмиссионной плазмы графитового катода описывается соотношением $(9 \cdot 10^{14})/x^2, \text{ cm}^{-3}$ при x в миллиметрах [15]. Формирование сплошного плазменного слоя происходит за счет расширения отдельных эмиссионных центров, поэтому концентрация катодной плазмы может ограничивать плотность электронного тока. Цель выполненных исследований — анализ влияния анодной и катодной плазмы на работу вакуумного диода со взрывоэмиссионным катодом при генерации сильноточного электронного пучка.

1. Экспериментальный стенд

Исследования выполнены на импульсном ускорителе ТЭУ-500 (300–500 кВ, 80 нс) [16]. На рис. 1 показан диодный узел ускорителя и диагностическое оборудование.

Мы использовали диод с плоским цилиндрическим катодом диаметром 60 мм, выполненным из разных материалов, АС-зазор — 12 мм. В качестве анода использовали плоский медный коллектор цилиндра Фарадея диаметром 92 мм. На рис. 2 показаны осциллограммы ускоряющего напряжения и электронного тока. Ускоряющее напряжение измеряли емкостным делителем, расположенным в маслonaполненной камере, и диффе-

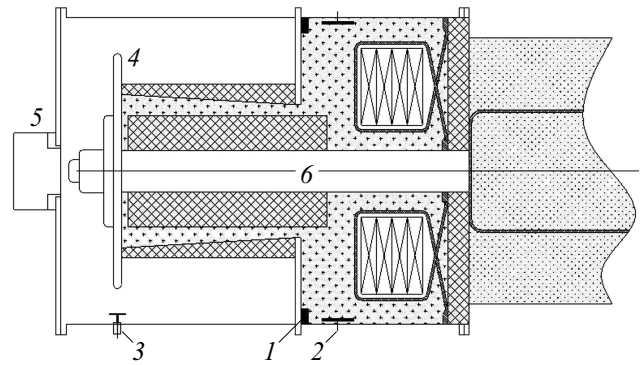


Рис. 1. Диагностическое оборудование импульсного электронного ускорителя ТЭУ-500: 1 — пояс Роговского, 2 — емкостный делитель, 3 — дифференциальный делитель напряжения, 4 — потенциальный диск диода, 5 — цилиндр Фарадея, 6 — катододержатель.

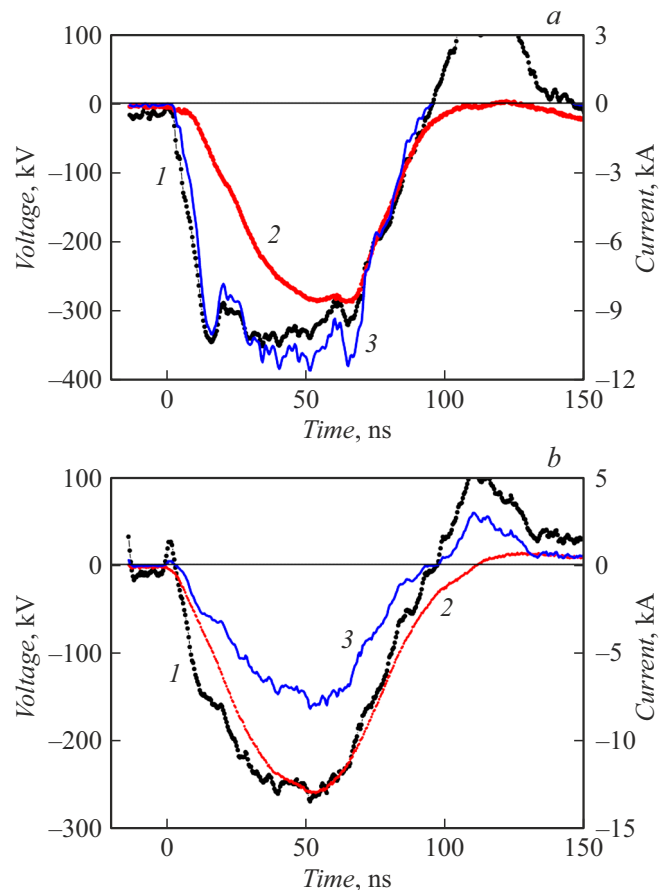


Рис. 2. Осциллограммы ускоряющего напряжения (1) и электронного тока (2). Кривая 3 — расчетный ток. Катод из графита (a) и с покрытием из углеродной ткани (b).

ренциальным делителем напряжения, расположенным в вакуумном объеме диодной камеры [17]. Полный ток электронного пучка измеряли цилиндром Фарадея, который откалибровали вместе с диодной камерой до давления 5–10 мПа.

На рис. 2 показаны также расчетные значения тока в диоде. Расчет выполнен по соотношению [18]:

$$I_e(t) = \frac{4\varepsilon_0\sqrt{2e}}{9\sqrt{m_e}} \cdot \frac{S_{cath} \cdot U^{3/2}}{d(t)^2} = 2.33 \cdot 10^{-6} \cdot U^{3/2} \cdot \frac{\pi(r_0 + v_{expl} \cdot t)^2}{(d_{AC} - v_{expl} \cdot t)^2}, \quad (1)$$

где S_{cath} — площадь катода, U — ускоряющее напряжение, ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость, r_0 — радиус катода, d_{AC} — начальный АС-зазор, m_e — масса электрона, e — заряд электрона, v_{expl} — скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы.

2. Расчет концентрации анодной плазмы

Анодная плазма в вакуумном диоде формируется при облучении электронным пучком рабочей поверхности анода, электронно-стимулированной десорбции молекул, их диссоциации и ионизации атомов около анода. При электронно-стимулированной десорбции молекулы получают дополнительную кинетическую энергию, так как она вызвана возбуждением электронной подсистемы атома [19] и при десорбции не вся эта энергия расходуется. В работе [20] показано, что при электронно-стимулированной десорбции метанола с алюминиевой поверхности спектр кинетической энергии молекул имеет максимум при энергии 0.1–0.2 eV и распределение молекул по скоростям значительно отличается от распределения Больцмана. В работах [21,22] показано, что спектр энергии молекул N₂O после электронно-стимулированной десорбции с поверхности Ru имеет максимум при энергии 0.13–0.15 eV. В наших экспериментах состав остаточного газа в диодной камере и адсорбированных молекул соответствует составу воздуха. При энергии молекул азота и кислорода после десорбции 0.15 eV анодный газовый слой будет расширяться со скоростью 0.17 cm/μs и его толщина в течение генерации электронного пучка будет менее 0.14 mm. Поэтому энергия электронов в анодном газовом слое превышает 100 keV при ускоряющем напряжении 300–500 kV.

Расчет концентрации анодной плазмы по сечению ударной ионизации затруднен из-за отсутствия достоверных значений сечения ионизации при энергии электронов более 5 keV [23]. Концентрацию анодной плазмы в АС-зазоре можно рассчитать из линейных потерь энергии электронов (ЛПЭ), так как при их энергии менее 1 MeV основной вклад в потери энергии при поглощении в мишени дают ионизационные процессы [24].

Допустим, что концентрация молекул в анодном газовом слое постоянна по всему объему и уменьшается в течение генерации электронного тока из-за расширения газового слоя с постоянной скоростью. Тогда средняя

концентрация анодной плазмы равна

$$n_{an}(t) = \frac{N_{sum}(t)}{V_{gas}(t)} = \frac{N_{sum}(t)}{S_{an} \cdot v_{gas1} \cdot t} \text{ [cm}^{-3}\text{]}, \quad (2)$$

где $N_{sum}(t)$ — общее количество ионов, которые образуются в анодном газовом слое, $V_{gas}(t)$ — объем анодного газового слоя, S_{an} — рабочая площадь анода, $v_{gas1} = \text{const}$ — скорость расширения анодного газового слоя.

Общее количество ионов, которые образуются в анодном газовом слое в течение генерации электронного пучка, равно двойному интегралу произведения количества ионов, образуемых одним электроном на единичном пути $N(E)$, и количества электронов, генерируемых в единицу времени, при интегрировании по длительности импульса электронного тока и по АС-зазору:

$$N_{sum}(t) = \int_0^{d_{A-C}} \int_0^\tau N(E) \frac{I_e(t)}{e} dx dt, \text{ [ions]}, \quad (3)$$

где $I_e(t)$ — электронный ток в диоде, [A], τ — длительность импульса.

Количество ионов, которые образуются на единичном пути в АС-зазоре одним электроном с энергией E , равно

$$N(E) = \frac{1}{E_{sum}} \frac{dE}{dx}, \text{ [ions/cm]}, \quad (4)$$

где dE/dx — ЛПЭ, [eV/cm], E_{sum} — сумма энергии диссоциации молекулы и ударной ионизации атома, [eV].

В наших экспериментах состав остаточного газа в диодной камере и адсорбированных молекул соответствует составу воздуха, поэтому при расчетах принимали $E_{sum} = 23$ eV с учетом диссоциации молекул N₂ и O₂, ионизации атомов азота и кислорода и их парциального давления в воздухе.

ЛПЭ рассчитывали по программе ESTAR [25] по данным NIST. На рис. 3 приведена зависимость ЛПЭ в воздухе при давлении 1 atm и температуре 300 K.

Зависимость ЛПЭ от энергии электрона для дальнейших расчетов аппроксимировали функцией

$$\frac{dE}{dx} = 48.9 - 36.7[1 - \exp(0.11E)] - 9.9[1 - \exp(0.016E)], \text{ [keV/cm]}, \quad (5)$$

где E — энергия электрона, [keV].

ЛПЭ в программе ESTAR рассчитаны для концентрации молекул $n_0 = 2.7 \cdot 10^{19}$ cm⁻³. Диссоциация молекул и ударная ионизация атомов происходит в результате бинарных столкновений электрона (с молекулой или атомом), и поэтому ЛПЭ пропорциональны концентрации молекул. Тогда количество ионов, которые образуются одним электроном с энергией E на единичном пути в газовом слое с концентрацией молекул $n_{gas1}(t)$ равно:

$$N(E) = \frac{n_{gas1}(t)}{n_0} \frac{dE}{E_{sum} dx}, \text{ [ions/cm]}. \quad (6)$$

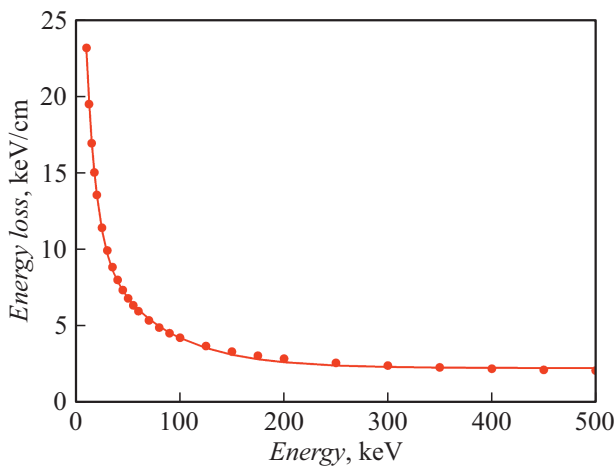


Рис. 3. Зависимость линейных потерь энергии электрона от его энергии [25].

При энергии электронов более 100 keV ЛПЭ не превышают 5 keV/cm и изменяются незначительно (рис. 3), поэтому изменением энергии электрона и величины ЛПЭ в анодном газовом слое и в течение генерации пучка в соотношении (3) можно пренебречь:

$$N_{sum}(t) = \int_0^{d_{A-C}} \int_0^\tau N(E) \frac{I_e(t)}{e} dx dt$$

$$= \frac{n_{gas1}(t) \cdot d_{A-C}}{n_0 \cdot e \cdot E_{sum}} \frac{dE}{dx} \int_0^\tau I_e(t) dt, \text{ [ions]}. \quad (7)$$

При концентрации молекул в анодном газовом слое $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ концентрация молекул в остальном объеме АС-зазора составляет $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Поэтому формирование анодной плазмы идет в основном в анодном газовом слое толщиной d_{an} и в соотношении (7) $d_{AC} \approx d_{an}$ и $n_{gas1} \cdot d_{an} = n_{s0} - n_s(t)$, где $n_s(t)$ — поверхностная плотность адсорбированных молекул на аноде, $[\text{cm}^{-2}]$, n_{s0} — начальная поверхностная плотность адсорбированных молекул. Тогда общее количество ионов, которые образуются в анодном газовом слое в течение генерации электронного пучка, равно

$$N_{sum}(t) = \frac{[n_{s0} - n_s(t)]}{n_0 \cdot e \cdot E_{sum}} \frac{dE}{dx} \int_0^\tau I_e(t) dt, \text{ [ions]}. \quad (8)$$

Скорость уменьшения поверхностной плотности адсорбированных молекул на аноде при генерации электронного пучка равна [26, 27]:

$$\frac{dn_s(t)}{dt} = -\sigma_{des} \cdot \phi_e(t) \cdot n_s(t), \text{ [cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (9)$$

где σ_{des} — сечение электронно-стимулированной десорбции молекул, $[\text{cm}^2]$; $\phi_e(t)$ — плотность потока электронов на поверхности анода, $[\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$.

Допустим, что плотность электронного тока постоянна по сечению пучка. Средняя (по рабочей площади анода) плотность потока электронов равна

$$\phi_e(t) = \frac{I_e(t)}{S_{an} \cdot e}, \text{ [cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \quad (10)$$

Тогда скорость уменьшения поверхностной плотности адсорбированных молекул на аноде при генерации электронного пучка равна

$$\frac{dn_s(t)}{dt} = -\frac{\sigma_{des} \cdot I_e(t) \cdot n_s(t)}{S_{an} \cdot e}, \text{ [cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \quad (11)$$

Сечение электронно-стимулированной десорбции молекул находится в пределах от 10^{-22} cm^2 [28,29] до 10^{-16} cm^2 [30,31]. Сечение электронно-стимулированной десорбции молекул кислорода с титановой мишени при температуре 300 К составляет $10^{-19} - 10^{-18} \text{ cm}^2$ [32]. Экспериментальных данных по сечению электронно-стимулированной десорбции молекул азота с медной мишени нет. В работе [19] показано, что сечение электронно-стимулированной десорбции слабо зависит от энергии электронов. При сечении электронно-стимулированной десорбции менее 10^{-18} cm^2 и начальной поверхностной плотности адсорбированных молекул на аноде 10^{16} cm^{-2} их поверхностная плотность в течение генерации электронного пучка (80 ns, рис. 2) уменьшится менее чем на 10^{12} cm^{-2} . Таким изменением поверхностной плотности адсорбированных молекул на аноде можно пренебречь и соотношение (11) можно записать в виде

$$\frac{dn_s(t)}{dt} = -\frac{n_{s0} \cdot \sigma_{des}}{S_{an} \cdot e} I_e(t), \text{ [cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \quad (12)$$

Тогда поверхностная плотность адсорбированных молекул на аноде будет уменьшаться в течение генерации электронного пучка по соотношению

$$n_s(t) = n_{s0} - \frac{\sigma_{des} \cdot n_{s0}}{S_{an} \cdot e} \int_0^\tau I_e(t) dt, \text{ [cm}^{-2}\text{]}. \quad (13)$$

Из соотношений (2), (8) и (13) получим

$$n_{an}(t) = \frac{\sigma_{des} \cdot n_{s0}}{S_{an}^2 \cdot t \cdot v_{gas1} \cdot e^2 \cdot n_0 \cdot E_{sum}} \frac{dE}{dx} \times \left[\int_0^\tau I_e(t) dt \right]^2, \text{ [cm}^{-3}\text{]}. \quad (14)$$

Соотношение (14) учитывает изменение концентрации молекул в анодном газовом слое из-за увеличения количества десорбированных молекул и расширения газового слоя в течение генерации электронного пучка. Это соотношение учитывает также изменение количества электронов при изменении электронного тока и

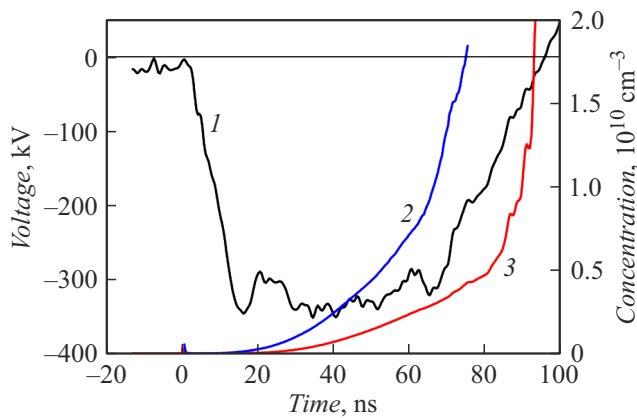


Рис. 4. Осциллограмма ускоряющего напряжения (1) и изменение концентрации анодной плазмы в течение генерации электронного пучка. Катод из графита (2) и с покрытием из углеродной ткани (3).

изменение ЛПЭ из-за изменения ускоряющего напряжения.

В наших экспериментальных условиях угол рассеяния электронов в АС-зазоре составляет 130 ± 5 градусов [16] и при диаметре катода 6 см, АС-зазоре 1.2 см площадь анода, облучаемая электронным пучком, равна 75 cm^2 . При расчетах примем, что молекулы азота и кислорода после десорбции имеют энергию 0.15 eV и анодный газовый слой расширяется со скоростью $0.17 \text{ cm}/\mu\text{s}$. Тогда средняя концентрация анодной плазмы при сечении электронно-стимулированной десорбции 10^{-18} cm^2 равна

$$n_{an}(t) = \frac{6.6 \cdot 10^5}{t} \frac{dE}{dx} \left[\int_0^t I_e(t) dt \right]^2, \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (15)$$

при токе в kA, времени в ns, dE/dx в keV/cm.

Результаты расчетов по соотношению (15) показаны на рис. 4.

На рис. 4 показаны также результаты расчета изменения концентрации анодной плазмы в течение генерации электронного пучка диодом с алюминиевым катодом, покрытым углеродной тканью (рис. 2, b).

Расчет концентрации анодной плазмы выполнен при условии, что поверхностная плотность молекул на аноде не уменьшается в серии импульсов. Плотность потока молекул на анод равна

$$\phi_a = \frac{n_0 \cdot v_m}{4} = \frac{n_0}{4} \sqrt{\frac{3k_B T}{m_a}}, \quad [\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}],$$

где m_a — масса молекулы, v_m — ее средняя скорость, k_B — постоянная Больцмана.

При давлении 10 мПа концентрация молекул остаточного газа в диодной камере составляет $2.7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. При температуре 300 К средняя скорость молекул

кислорода и азота равна $(4.8-5.2) \cdot 10^4 \text{ cm/s}$. Тогда плотность потока молекул на анод составит $(1.3-1.4) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

В работе [33] представлены результаты исследования десорбции молекул с поверхности мишени лазерным излучением ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) в вакуумной камере при давлении $2 \cdot 10^{-9}$ Па. Исследования проводили с мишенями из свинца, меди и титана при температуре 300 К, площадь области облучения составляла 0.03 cm^2 . Установлено, что количество десорбированных молекул равно $5 \cdot 10^{14}$, что соответствует их поверхностной плотности до облучения $\approx 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. При плотности потока молекул на анод $\approx 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ продолжительность формирования монослоя составит менее 0.1 с. В наших экспериментах частота следования импульсов не превышает 2 импульса в секунду, и между импульсами на электродах диода восстанавливается равновесная поверхностная плотность адсорбированных молекул.

В наших экспериментальных условиях один электрон десорбирует не более одной молекулы с поверхности анода ($\sigma_{des} n_{s,0} < 1$). В работе [6] показано, что воздействие импульсного электронного пучка с энергией электронов 10 keV на поверхность анода приводит к десорбции молекул газа с эффективностью 1–2 молекулы на электрон.

В течение генерации электронного пучка возможна и рекомбинация анодной плазмы. Степень ионизации анодной плазмы составляет $\sim 10^{-3}$, поэтому рекомбинация происходит при трехчастичном взаимодействии электрона, иона и атома, скорость рекомбинации равна [34,35]:

$$\frac{dn_e}{dt} = -\beta \cdot n_i \cdot n_e \cdot n_{gas1} \approx -\beta \cdot n_{an}^2 \cdot n_{gas1}, \quad [\text{cm}^{-3} \text{ s}^{-1}], \quad (16)$$

где β — константа скорости рекомбинации.

Константа скорости рекомбинации равна [36]

$$\beta = 5.4 \cdot 10^{-27} \cdot Z^3 \cdot T_e^{-4.5}, \quad [\text{cm}^6/\text{s}],$$

где T_e — электронная температура анодной плазмы в eV, Z — кратность ионизации.

Для однократно ионизованных ионов и $T_e = 1 \text{ eV}$ константа скорости рекомбинации равна $5.4 \cdot 10^{-27} \text{ cm}^6/\text{s}$.

Константу скорости рекомбинации также можно рассчитывать по соотношению [34,37]:

$$\beta = \frac{10^{-14} \sigma_0}{I} \left(\frac{I}{T_e} \right)^{4.5}, \quad [\text{cm}^6/\text{s}],$$

где $\sigma_0 \approx 10^{-16} \text{ cm}^2$ — газокинетическое сечение, I — энергия ионизации.

При энергии ионизации 14 eV и электронной температуре анодной плазмы 1 eV константа скорости рекомбинации равна $1 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^6/\text{s}$. При константе скорости рекомбинации $(0.54-1.0) \cdot 10^{-26} \text{ cm}^6/\text{s}$ скорость рекомбинации анодной плазмы равна $(4-7) \cdot 10^{-12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ и в течение 80 ns концентрация анодной плазмы уменьшится на $10^{-5}\%$. Поэтому процесс рекомбинации дает

незначительный вклад в изменение концентрации анодной плазмы в течение генерации электронного пучка.

Расчет концентрации анодной плазмы выполнен при сечении электронно-стимулированной десорбции 10^{-18} cm^2 , что является максимальным значением десорбции молекул кислорода с титановой мишени [32]. Поэтому к концу импульса средняя концентрация анодной плазмы в диоде с графитовым катодом не превышает 10^{10} cm^{-3} , толщина области анодной плазмы составляет 0.014 cm , концентрация молекул в анодном газовом слое $\approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, а степень ионизации анодной плазмы менее 10^{-3} . Увеличение электронного тока в диоде с катодом, покрытым углеродной тканью, вызывает рост концентрации анодной плазмы.

3. Расчет концентрации катодной плазмы

Анодный газовый слой из молекул азота и кислорода расширяется со скоростью $\sim 0.17 \text{ cm}/\mu\text{s}$ и через 80 ns его толщина составит 0.014 cm . Скорость расширения взрывоэмиссионной плазмы равна $2\text{--}4 \text{ cm}/\mu\text{s}$ [13] и поэтому АС-зазор будет заполнен в основном взрывоэмиссионной плазмой. Однако до начала взрывной эмиссии на поверхности катода находился слой адсорбированных молекул. На фронте импульса ускоряющего напряжения все эти молекулы десорбируются и перемещаются в виде расширяющегося газового слоя на фронте взрывоэмиссионной плазмы. В течение импульса электроны ускоряются в АС-зазоре с эмиссионной границы взрывоэмиссионной плазмы, диссоциируют молекулы и ионизируют атомы в газовом слое на фронте плазмы. Энергия электронов при этом меньше $e \cdot U$ и ЛПЭ в катодном газовом слое значительно возрастают (рис. 3).

3.1. Расчет по линейным потерям энергии

Допустим, что концентрация молекул в катодном газовом слое постоянна по всему объему и уменьшается при его расширении с постоянной скоростью, а плотность электронного тока постоянна по сечению и меняется в течение генерации пучка. Тогда средняя концентрация катодной плазмы равна

$$n_{cath1} = \frac{N_{sum2}(t)}{S_{cath} \cdot v_{gas2} \cdot t}, \quad [\text{cm}^{-3}], \quad (17)$$

где $N_{sum2}(t)$ — общее количество ионов, которые образуются в катодном газовом слое при ударной ионизации; S_{cath} — рабочая площадь катода; $v_{gas2} = \text{const}$ — скорость расширения катодного газового слоя.

Расчет $N_{sum2}(t)$ выполняли аналогично соотношению (3):

$$N_{sum2}(t) = \int_0^{d_{A-C}} \int_0^{\tau} N_2(E) \frac{I_e(t)}{e} dx dt, \quad [\text{ions}]. \quad (18)$$

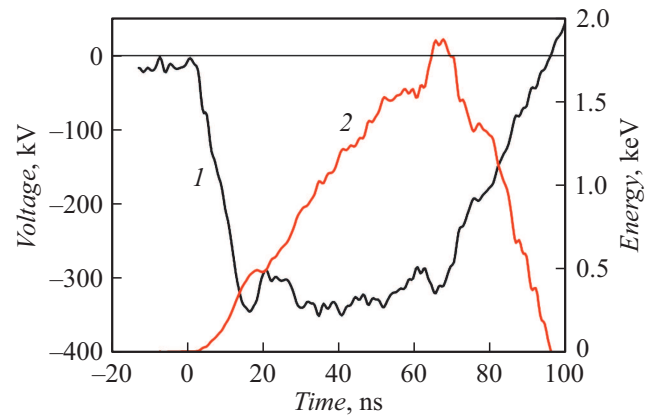


Рис. 5. Оциллограмма ускоряющего напряжения (1) и изменение средней энергии электронов в катодном газовом слое в течение генерации пучка (2). Графитовый катод.

Количество ионов, которые образуются одним электроном с энергией E на единичном пути в катодном газовом слое с концентрацией молекул $n_{gas2}(t)$, равно

$$N_2(E) = \frac{n_{gas2}(t) dE}{n_0 \cdot E_{sum} dx}(x, t), \quad [\text{ions/cm}]. \quad (19)$$

При расчетах принимали температуру газового слоя 1000 K [38], скорость расширения газовой плазмы при этом равна $0.19 \text{ cm}/\mu\text{s}$ и за 80 ns толщина катодного газового слоя составит 0.015 cm . Расчет средней энергии электронов в объеме катодного газового слоя выполнен при скорости расширения взрывоэмиссионной плазмы $v_{expl} = 2 \text{ cm}/\mu\text{s}$:

$$E(t) = \frac{e \cdot U(t) \cdot v_{gas2} \cdot t}{2(d_{A-C} - v_{expl} \cdot t)}, \quad [\text{eV}]. \quad (20)$$

При АС-зазоре 1.2 cm средняя энергия электронов в катодном газовом слое не превышает 2 keV при ускоряющем напряжении $300\text{--}350 \text{ kV}$ (рис. 5).

На фронте импульса ускоряющего напряжения все молекулы десорбируются с поверхности катода и образуют расширяющийся газовый слой. При начальной поверхностной плотности адсорбированных молекул 10^{16} cm^{-2} средняя концентрация атомов в катодном газовом слое к концу импульса составит $\approx 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ при концентрации молекул остаточного газа в АС-зазоре $\approx 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Поэтому ударная ионизация молекул идет в основном вблизи катода в десорбированном газовом слое толщиной d_{cath} .

С увеличением энергии электрона ЛПЭ снижаются (рис. 3) и поэтому в течение генерации пучка в катодном газовом слое (расчет по средней энергии электронов) ЛПЭ меняются незначительно, средняя величина составляет $45 \text{ keV/cm} \pm 4.5\%$. ЛПЭ по глубине катодного газового слоя также меняются незначительно, в конце импульса они составляют $45 \text{ keV/cm} \pm 4.7\%$. Поэтому изменением величины ЛПЭ в пределах катодного газового

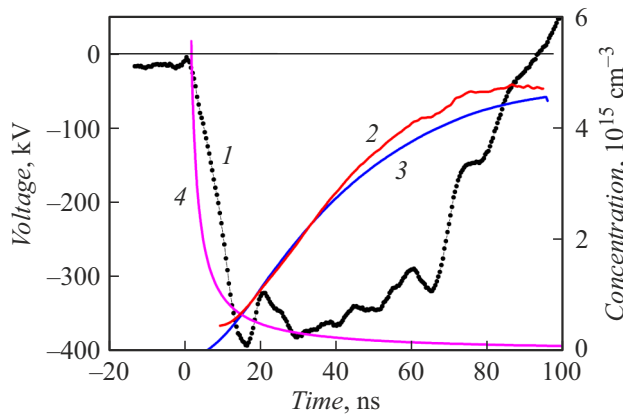


Рис. 6. Осциллограмма ускоряющего напряжения (1) и изменение концентрации катодной газовой плазмы. Расчет по ЛПЭ (2) и по сечению ионизации (3). Кривая 4 — изменение концентрации взрывоэмиссионной плазмы.

слоя и в течение генерации пучка можно пренебречь и тогда в соотношении (18) $d_{AC} \approx d_{cath}$ и $n_{gas2} \cdot d_{cath} = n_{s0}$:

$$N_{sum2}(t) = \frac{n_{gas2}(t) \cdot d_{cath}}{n_0 \cdot e \cdot E_{sum}} \frac{dE}{dx} \int_0^{\tau} I_e(t) dt$$

$$= \frac{n_{s0}}{n_0 \cdot e \cdot E_{sum}} \frac{dE}{dx} \int_0^{\tau} I_e(t) dt, \text{ [ions].}$$

Средняя (по площади катода) концентрация катодной газовой плазмы равна

$$n_{cath1} = \frac{n_{s0}}{n_0 \cdot v_{gas2} \cdot S_{cath} \cdot t \cdot e \cdot E_{sum}} \frac{dE}{dx} \int_0^{\tau} I_e(t) dt, \text{ [cm}^{-3}\text{].} \quad (21)$$

Результаты расчетов по соотношению (21) показаны на рис. 6.

3.2. Расчет по сечению ионизации

Толщина катодного газового слоя не превышает 0.015 см и энергия электронов, которые формируют катодную газовую плазму, не превышает 2 keV (рис. 5). Поэтому концентрацию катодной газовой плазмы можно рассчитать по сечению ионизации. Скорость ионизации десорбированных молекул равна

$$\frac{dn_{cath2}}{dt} = \sigma_i(t) \cdot n_{gas2}(t) \cdot \phi_e(t), \text{ [cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (22)$$

где σ_i — сечение ионизации, $[\text{cm}^2]$, ϕ_e — плотность потока электронов, $[(\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$.

Сечение ударной ионизации атомов азота по данным NIST [39] показано на рис. 7.

При энергии электрона от 40 eV до 5 keV зависимость сечения ударной ионизации атома азота от энергии электрона аппроксимировали уравнением (рис. 7, линия):

$$\sigma_i = 150 \cdot 10^{-16} \frac{\ln(0.025 \cdot E)}{E}, \text{ [cm}^2\text{]}$$

при энергии в eV.

При взрывной эмиссии электронов происходит полная десорбция молекул на рабочей поверхности катода, и средняя концентрация атомов в катодном газовом слое равна:

$$n_{gas2} = \frac{n_{s0}}{v_{gas2} \cdot t}, \text{ [cm}^{-3}\text{]}. \quad (23)$$

Изменение концентрации катодной газовой плазмы в течение генерации электронного пучка равно

$$n_{cath2} = \frac{0.66 n_{s0}}{v_{gas2} \cdot S_{cath} \cdot c} \int_0^{\tau} \frac{\sigma_i(t) \cdot I_e(t)}{t} dt, \text{ [cm}^{-3}\text{]}. \quad (24)$$

Расчет концентрации катодной газовой плазмы по сечению ионизации выполнен с учетом затрат энергии электронов на диссоциацию молекул азота, равных 9.7 eV при энергии ионизации 14.5 eV (коэффициент 0.66). Результаты расчетов по соотношению (24) показаны на рис. 6.

Снижение энергии электронов при ионизации атомов в катодном газовом слое значительно повышает эффективность ионизации (рис. 7). К концу импульса средняя концентрация катодной газовой плазмы (на внешней границе взрывоэмиссионной плазмы) возрастает до $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, а толщина области катодной газовой плазмы составляет 0.015 см. Средняя концентрация атомов в газовом слое на внешней границе взрывоэмиссионной плазмы к концу импульса составляет $\approx 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Степень ионизации катодной газовой плазмы равна $\approx 10^{-2}$, что значительно выше степени ионизации анодной плазмы.

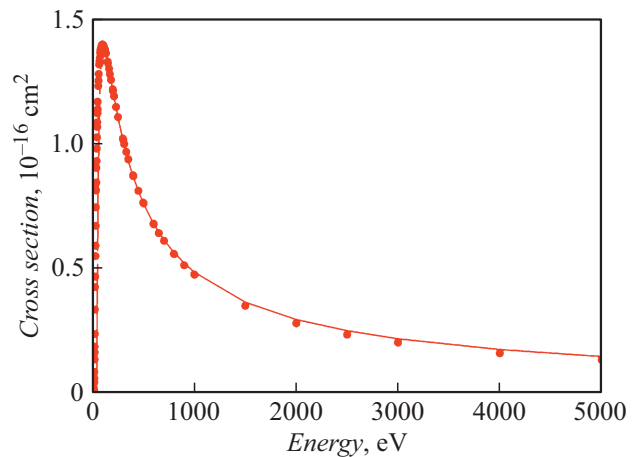


Рис. 7. Зависимость сечения ударной ионизации атома азота от энергии электрона [39].

4. Расчет концентрации взрывоэмиссионной плазмы

В диоде с взрывоэмиссионным катодом формирование катодной плазмы происходит при взрывной эмиссии электронов на фронте импульса. При формировании плазмы можно выделить два режима: режим дискретной эмиссионной поверхности и режим ограничения объемным зарядом [2]. С момента приложения напряжения к диоду до формирования сплошной плазменной поверхности на катоде (режим дискретной эмиссионной поверхности) ток диода ограничивается эмиссионной способностью катода, так как взрывоэмиссионная плазма на рабочей поверхности катода формируется в виде отдельных эмиссионных центров [2]. После формирования первых эмиссионных центров происходит подавление формирования других центров из-за выравнивания напряженности электрического поля (эффект экранировки) [10]. После формирования сплошного плазменного слоя на катоде (концентрация более 10^{14} cm^{-3}) процесс взрывной эмиссии прекращается, так как толщина плазменного слоя существенно превышает высоту микроострий и локальное усиление электрического поля отсутствует. Генерация новых эмиссионных центров в результате усиления ионного тока из анодной плазмы на микроострия на поверхности катода [2,12,38] возможна только до формирования сплошного плазменного слоя на катоде. Зарядка диэлектрических включений и пленок на катоде потоком ионов из плазмы и их последующий пробой [38,40] также возможны только в режиме дискретной эмиссионной поверхности. Поэтому электронный ток в АС-зазоре вакуумного диода со взрывоэмиссионным катодом может быть ограничен концентрацией электронов в катодной плазме.

Исследования концентрации взрывоэмиссионной плазмы были выполнены на ускорителе ТЕМП-4М при генерации ионного пучка плоским полосковым диодом со взрывоэмиссионным катодом в двухимпульсном режиме при магнитной самоизоляции электронов [41] (рис. 8).

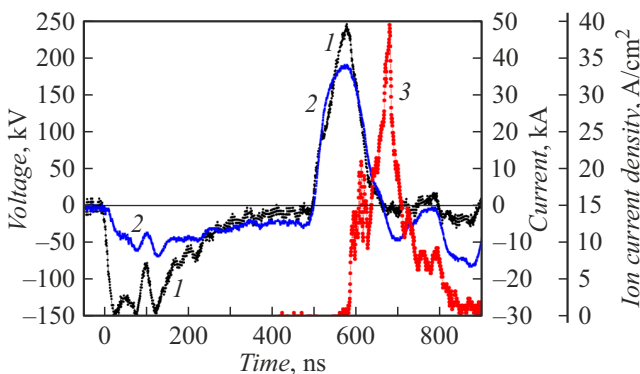


Рис. 8. Оциллограммы ускоряющего напряжения (1), полного тока в диоде (2) и плотности ионного тока, генерируемого полосковым ионным диодом (3).

Плотность ионного тока измеряли коллимированным цилиндром Фарадея, расположенным на расстоянии 17 см от диода. При плотности заряда ионов $3.4 \cdot 10^{-6} \text{ C/cm}^2$ (интеграл плотности ионного тока (рис. 8)) флюенс ионов составляет $\sim 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. Сплошной слой взрывоэмиссионной плазмы формируется из плазмы отдельных эмиссионных центров, которые образуются на фронте импульса. В дальнейшем количество ионов в катодной плазме не увеличивается, а только уменьшается за счет эмиссии и ускорения в АС-зазоре. Тогда изменение концентрации взрывоэмиссионной плазмы в течение генерации электронного пучка без учета эмиссии электронов равно

$$n_i^{\min}(t) = \frac{2 \cdot 10^{13}}{v_{\text{expl}} \cdot t}, \quad [\text{cm}^{-3}]. \quad (25)$$

Результаты расчетов по соотношению (25) при $v_{\text{expl}} = 2 \text{ cm}/\mu\text{s}$ показаны на рис. 6. Концентрация взрывоэмиссионной плазмы через 50 ns составляет $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, что близко к данным, полученным в других работах [12,14,15].

5. Анализ влияния катодной плазмы на генерацию электронного пучка

Выполненные исследования показали, что эффективность генерации электронного пучка в вакуумном диоде с взрывоэмиссионным катодом зависит от материала катода. Использование катода с развитой поверхностью (катод с покрытием из углеродной ткани, многоострийный медный и вольфрамовый катоды) позволяет увеличить полный ток электронного пучка (по сравнению с расчетным по ЧЛ) без изменения диаметра катода и АС-зазора (рис. 2).

Электронный ток в вакуумном диоде ограничен эмиссионной способностью катодной плазмы, плотность тока насыщения равна хаотическому тепловому току электронов катодной плазмы [38]:

$$j_{e0} = en_k \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi \cdot m_e}} = en_k \sqrt{\frac{E}{3\pi \cdot m_e}} \\ = 0.48 \cdot 10^{-11} \cdot n_k, \quad [\text{A/cm}^2]$$

при энергии электронов в катодной плазме в eV и концентрации плазмы в cm^{-3} .

Тогда максимальный ток равен

$$I_{e \text{ max}} = S_k \cdot j_{e0} = 14 \cdot 10^{-11} \cdot n_k, \quad [\text{A}].$$

Для взрывоэмиссионной плазмы максимальный ток превышает экспериментальные значения в течение всего времени генерации пучка (рис. 9).

Однако высокая концентрация катодной плазмы является необходимым, но не достаточным условием эффективной генерации электронного пучка. Полный заряд электронов в катодной плазме должен быть значительно

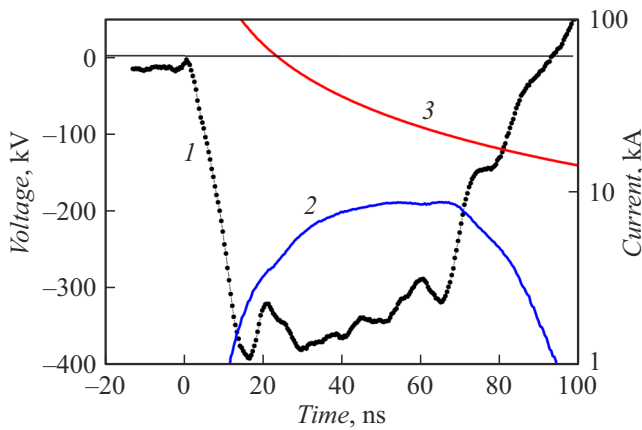


Рис. 9. Осциллограмма ускоряющего напряжения (1), изменение модуля полного тока в диоде (2) и максимального тока для взрывоэмиссионной плазмы (3). Катод из графита.

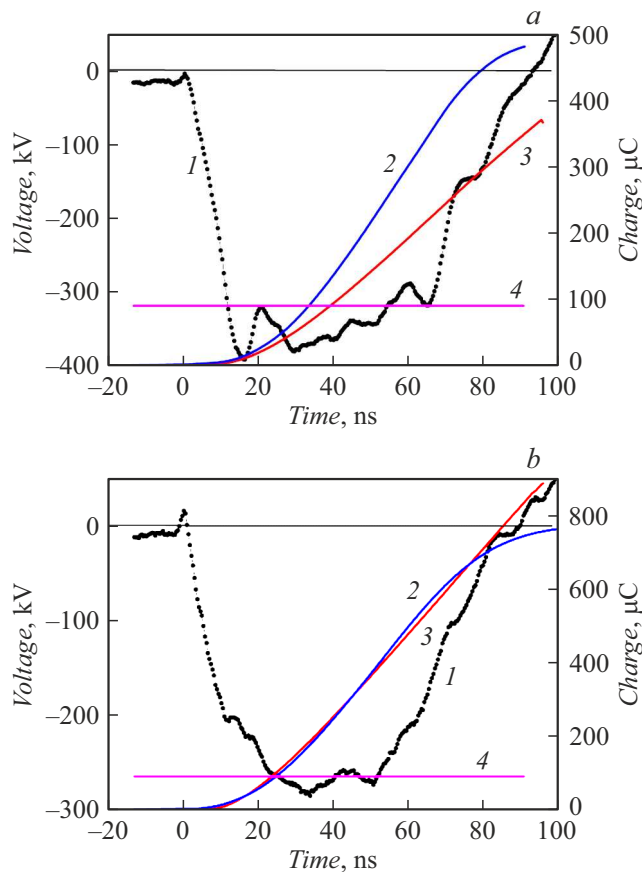


Рис. 10. Осциллограмма ускоряющего напряжения (1), изменение заряда электронного пучка (2), полного заряда катодной плазмы (3) и заряда взрывоэмиссионного плазменного слоя (4). Катод из графита (а) и с покрытием из углеродной ткани (b).

больше полного заряда электронного пучка в течение всего импульса. На рис. 10 приведены результаты расчета изменения полного заряда катодной плазмы в течение

генерации электронного пучка. Расчет выполнен без учета потерь электронов на формирование электронного пучка:

$$Q_e = S \cdot n_{cath} \cdot v_{cath} \cdot t \cdot e, \quad [C]. \quad (26)$$

Заряд взрывоэмиссионного плазменного слоя значительно меньше заряда электронного пучка и основным источником электронов является не взрывоэмиссионная плазма, а катодная газовая плазма. Электронный ток при этом ограничивается концентрацией катодной плазмы, так как он меньше расчетного (рис. 2, а).

Использование углеродной ткани на рабочей поверхности катода позволило увеличить полный заряд электронного пучка в 1.6 раз (рис. 2, b). На рис. 10, b приведены результаты расчета изменения полного заряда катодной плазмы в течение генерации электронного пучка диодом с катодом с углеродной тканью, площадь катода увеличена на 25%. Увеличение площади сорбции на поверхности углеродной ткани увеличило концентрацию десорбированных молекул в катодном газовом слое и концентрацию катодной газовой плазмы. Полный заряд взрывоэмиссионной плазмы ограничен количеством центров взрывной эмиссии электронов на поверхности катода из-за эффекта экранировки и будет одинаков для катодов диаметром 6 см, выполненных из графита и углеродной ткани. При расчетах (интеграл соотношения 25) он составил 90 μC.

Заключение

Низкая эффективность электронно-стимулированной десорбции молекул с рабочей поверхности анода (менее одной молекулы на электрон) и незначительные линейные потери энергии электронов (менее 20 eV/cm) в анодном газовом слое обеспечивают низкую концентрацию анодной плазмы, которая не превышает 10^{10} cm^{-3} , степень ионизации анодной плазмы менее 10^{-3} . Давление в анодном газовом слое незначительно превышает давление остаточного газа в АС-зазоре при работе диода в техническом вакууме. Скорость расширения анодной плазмы составляет $\sim 0.17 \text{ cm}/\mu\text{s}$ и толщина плазменного слоя не превышает 1% АС-зазора при длительности импульса 100 ns. Поэтому анодная плазма не вносит заметного вклада в работу вакуумного диода с пассивным катодом при длительности импульса менее 0.1 μs.

Значительно более высокую концентрацию имеет катодная газовая плазма, которая формируется при десорбции молекул с поверхности катода, их диссоциации и ударной ионизации атомов. Полная десорбция молекул с рабочей поверхности катода и высокая эффективность ионизации атомов в катодном газовом слое обеспечивают высокую концентрацию плазмы $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ и высокую степень ионизации, достигающую 10^{-2} .

Заряд взрывоэмиссионного плазменного слоя значительно меньше заряда электронного пучка и основным источником электронов является не взрывоэмиссионная плазма, а катодная газовая плазма. Электронный ток при

этом ограничивается концентрацией катодной плазмы. Использование катода с развитой поверхностью (катод с покрытием из углеродной ткани, многоострый медный и вольфрамовый катоды) позволяет увеличить полный заряд электронного пучка более чем в 1.5 раза без изменения диаметра катода и АС-зазора.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.П. Бугаев, Ю.Е. Крендель, П.М. Щанин. *Электронные пучки большого сечения* (Энергоатомиздат, М., 1984)
- [2] Г.А. Месяц. *Импульсная энергетика и электроника* (Наука, М., 2004)
- [3] С.Ю. Соковнин. *Наносекундные ускорители электронов для радиационных технологий* (Изд-во Уральского ГАУ, Екатеринбург, 2017)
- [4] Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин. *ЖТФ*, **73** (4), 124 (2003).
- [5] Ya.E. Krasik, A. Dunaevsky, J.Z. Gleizer, J. Felsteiner, Yu.A. Kotov, S.Yu. Sokovnin, M.E. Balezin. *J. Appl. Phys.*, **91**, 9385 (2002). DOI: 10.1063/1.1476964
- [6] Э.Н. Абдуллин, Г.П. Баженов. *ЖТФ*, **51** (9), 1969 (1981).
- [7] I. Langmuir. *Phys. Rev.*, **2**, 45, (1913).
- [8] R.K. Parker, R.E. Anderson, C.V. Duncan. *J. Appl. Phys.*, **45** (6), 2463 (1974).
- [9] А.И. Пушкарев, Р.В. Сазонов. *Приборы и техника эксперимента*, **6**, 103 (2008).
- [10] С.Я. Беломытцев, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц. *Письма в ЖТФ*, **6** (18), 1089 (1980).
- [11] И.В. Пегель. *Нестационарные процессы генерации сильноточных электронных пучков и мощных импульсов электромагнитного излучения*. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук (Томск, 2006), 213 с.
- [12] Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. *Импульсный электрический разряд в вакууме* (Наука, Новосибирск, 1984)
- [13] Li Limin, L. Chang, J. Liu, G. Chen, J. Wen. *Laser and Particle Beams*, **30** (4), 541 (2012).
- [14] D. Yarmolich, V. Vekselman, V.Tz. Gurovich, J.Z. Gleizer, J. Felsteiner, Ya.E. Krasik. *Phys. Plasmas*, **15**, 123507 (2008).
- [15] Д.И. Проскуровский. *Плазменная электроника* (Изд-во ТПУ, Томск, 2010)
- [16] А.И. Пушкарев, Ю.Н. Новоселов, Р.В. Сазонов. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 117 (2007).
- [17] Ю.И. Исакова, А.И. Пушкарев, Г.Е. Холодная. *Приборы и техника эксперимента*, **2**, 39 (2011).
- [18] А.И. Пушкарев. *ЖТФ*, **78** (3), 78 (2008).
- [19] В.Н. Агеев, О.П. Бурмистрова, Ю.Л. Кузнецов. *УФН*, **158** (3), 389 (1989).
- [20] C.E. Young, J.E. Whitten, M.J. Pellin, D.M. Gruen, P.L. Jones. *Proceedings of the Fourth International Workshop Desorption Induced by Electronic Transitions DIET IV*, (1989), p. 187.
- [21] P. Feulner. *Proceedings of the Second International Workshop Desorption Induced by Electronic Transitions. DIET II*, (1984), p. 142.
- [22] Z.W. Gortel, H.J. Kreuzer, P. Feulner, D. Menzel. *Proceedings of the Third International Workshop Desorption Induced by Electronic Transitions. DIET III*. (1987), p. 173.
- [23] Электронный ресурс. Режим доступа: https://physics.nist.gov/PhysRefData/Ionization/atom_index.html
- [24] P. Sigmund. *Particle Penetration and Radiation Effects. Volume 2: Penetration of Atomic and Molecular Ions* (Springer International Publishing, 2014)
- [25] M. Berger, J. Coursey, M. Zucker, Chang J. NIST Standard Reference Database, 124 (2017). <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- [26] T.E. Madey, R. Stockbauer. *Experimental methods in electron and photon-stimulated desorption*. In *Methods of Experimental Physics: V. 22*. Ed. by R.L. Park, M.G. Lagally (Academic Press Inc., 1985)
- [27] В.П. Кривобоков. *Радиационные и плазменные технологии: терминологический справочник* (Наука, Новосибирск, 2010)
- [28] В.Н. Агеев, Ю.А. Кузнецов, Б.В. Якшинский. *ФТТ*, **24**, 349 (1982).
- [29] V.N. Ageev, O.P. Burmistrova, B.V. Yakshinsk. *Surf. Sci.*, **194**, 101 (1988).
- [30] T.E. Madey, J.T. Yates. *J. Vacuum Sci. Technol.*, **8**, 525 (1971).
- [31] D. Menzel. *Topics Appl. Phys.*, **4**, 101 (1975).
- [32] P.H. Dawson. *Surf. Sci.*, **65**, 41 (1977).
- [33] В.Е. Миронов, Б.А. Шестаков. *Сообщения объединенного института ядерных исследований. Дубна. 9-86-304*, 1–7. (1986).
- [34] A. Fridman. *Plasma Chemistry* (Cambridge Univer. Press, NY, 2008)
- [35] P.M. Bellan. *Fundamentals of Plasma Physics* (Cambridge Univer. Press, 2006)
- [36] V.S. Vorob'ev. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **4**, 163 (1995).
- [37] L.M. Biberman, V.S. Vorobjev, L.T. Yacubov. *Adv. Phys. Sci.*, **107**, 353 (1972).
- [38] Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский. *Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом* (Наука, Изд-во СО РАН, Новосибирск, 2018)
- [39] Y.-K. Kim, J.-P. Desclaux. *Phys. Rev. A*, **66**, 012708 (2002). https://physics.nist.gov/cgi-bin/Ionization/ion_data.php?id=NI&ision=I&initial=&total=Y
- [40] Г.А. Месяц. *ПМТФ*, **5**, 138 (1980).
- [41] А.И. Пушкарев, Ю.И. Исакова, Р.В. Сазонов, Г.Е. Холодная. *Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом* (Физматлит, М., 2013)