

ФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.38

**ОСОБЕННОСТИ ПОСЛЕРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИОДЕ
НА СТАДИИ СПАДА ИМПУЛЬСА ВОЗБУЖДЕНИЯ РАЗРЯДА**

М. В. Ленков, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой АИТП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-9553-2047, e-mail: lenkov.m.v@rsreu.ru

Е. В. Тинина, к.т.н., доцент, доцент кафедры АИТП РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-6846-4192, e-mail: alen-pa14@yandex.ru

В ряде газоразрядных приборов с практической точки зрения важен случай, когда восстановление обратного напряжения протекает с задержкой из-за возникновения явления избыточной послеразрядной проводимости, которое связано с протеканием обратного тока. В работе проводится анализ особенностей послеразрядных процессов при восстановлении обратного напряжения на аноде диода с накалённым катодом на стадии среза импульса возбуждения. Рассматриваются процессы на начальной стадии среза импульса одновременно с влиянием обратного тока на длительность восстановления напряжения на аноде. Анализ проводится при диффузионном механизме распада плазмы. В ходе выполнения работы получено выражение потока частиц на анод на начальной стадии послеразрядных процессов, установлена связь между обратным током на анод и длительностью среза импульса возбуждения. Также проведена оценка длительности запаздывания восстановления обратного напряжения на аноде диода при возникновении избыточной послеразрядной проводимости.

Ключевые слова: диод, плазма, распад, ток, анод, напряжение, восстановление, проводимость, запаздывание, длительность.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-141-148

Введение

Во многих реальных схемах включения газоразрядных приборов импульс возбуждения разряда подаётся относительно отрицательного обратного напряжения $U_{обр}$ на каком-либо электроде, например в тиратронах это отрицательное напряжение на сетке. Импульсы возбуждения в большинстве случаев имеют трапецеидальную форму, которую формируют генераторы импульсов. При анализе процессов в основном рассматриваются идеализированные сигналы, в которых отдельные участки (фронт, вершина, срез) представлены в виде прямых отрезков. Уменьшение напряжения импульса от максимального значения до нуля называется длительностью t_c среза импульса.

При снятии импульса возбуждения в послеразрядный период на стадии восстановления обратного напряжения можно выделить два последовательных временных интервала. Первый интервал определяется длительностью среза t_c импульса возбуждения. Ко второму интервалу относится отрезок времени, когда послеразрядные процессы в промежутке протекают при восстановившемся обратном напряжении. В течение обоих интервалов происходит нейтрализация зарядов остаточной плазмы в разрядных промежутках прибора при её распаде. Описание общих процессов распада плазмы широко представлено в научной и учебной литературе, например в работах [1, 2, 3] и других.

При распаде плазмы нейтрализация заряженных частиц может осуществляться за счет следующих механизмов: 1) на поверхностях стенок прибора и электродах – поверхностная

рекомбинация; 2) в объеме промежутка – объемная рекомбинация. Основными факторами, определяющими механизм распада плазмы, являются давление и концентрация заряженных частиц в плазме. Объемная рекомбинация имеет место при давлениях газа в газоразрядных приборах в десятки и более мм рт. ст. и концентрации заряженных частиц 10^{14} 1/см³ и выше. В статье анализируются послеразрядные процессы при давлениях газа в десятые доли мм рт. ст. и концентрации частиц в плазме порядка 10^{13} 1/см³, что соответствует поверхностной рекомбинации. При поверхностной рекомбинации заряды на электроды попадают в результате их диффузионного движения в плазме, которое описывается уравнением амбиполярной диффузии [1].

В процессе распада плазмы в цепи электрода с напряжением $U_{обр}$ протекает обратный ток. Обратный ток может существенно влиять на процессы восстановления обратного напряжения. При низких обратных напряжениях основной составляющей обратного тока является статическая составляющая, которую создают заряды в результате хаотического движения в плазме. В некоторых газоразрядных приборах с практической точки зрения важен случай, когда восстановление обратного напряжения протекает с задержкой из-за возникновения явления избыточной послеразрядной проводимости, которое связано с протеканием обратного тока. Явление избыточной послеразрядной проводимости возникает на начальном участке кривой спада обратного тока. Выяснение физического механизма явления избыточной послеразрядной проводимости и его влияния на ряд параметров газоразрядных приборов подробно рассмотрено в работах [3–6]. В работе [7] отмечается, что явление избыточной послеразрядной проводимости может быть полезно как метод для измерения давления в тира-тронах. Однако все исследования проводились в основном за пределами среза импульса возбуждения. Представляет интерес выяснение послеразрядных процессов в границах длительности среза импульса возбуждения.

Целью данной работы является анализ особенностей послеразрядных процессов при восстановлении обратного напряжения на аноде диода с накалимым катодом на стадии среза импульса возбуждения.

Анализ особенностей послеразрядных процессов

1. Процессы на начальной стадии среза импульса.

На анод диода с накалимым катодом приложено отрицательное напряжение $U_{обр}$. Положительным импульсом возбуждения напряжением U , амплитуда которого больше напряжения $U_{обр}$, в разрядном промежутке в атмосфере чистого водорода низкого давления (десятые доли мм рт. ст.) создается дуговой разряд. Область разрядного промежутка заполнена в основном плазмой. В этой области число электронов почти равно числу положительных ионов. Поэтому плазма представляет область, в которой существует практически нулевая разность потенциалов на всей её длине, благодаря чему в ней создаётся однородное электрическое поле. Температура электронов в плазме разряда порядка десятков тысяч градусов, а температура ионов и молекул газа составляет порядка тысячи градусов, то есть равна температуре накаливаемого катода.

С момента снятия импульса возбуждения напряжение на аноде должно восстановиться до значения $U_{обр}$. Восстановление обратного напряжения неразрывно связано с процессом распада плазмы в промежутке. Нейтрализация заряженных частиц происходит только на электродах диода – катоде и аноде (короткие промежутки). За малый промежуток времени параметры плазмы не успевают измениться. Поэтому принимаем, что разрядный промежуток заполнен однородной плазмой. Длина пробега заряженных частиц меньше размеров разрядного промежутка, поэтому движение частиц в распадающейся плазме имеет диффузионный характер. Процесс распада плазмы характеризуется коэффициентом амбиполярной диффузии D_a . Его значение зависит от параметров плазмы и времени рассмотрения послеразрядных процессов от момента снятия импульса возбуждения.

Рассмотрим вначале послеразрядные процессы на момент прекращения разряда (рисунок 1). За короткий промежуток времени концентрация у границ плазмы (на катоде К и аноде А) обращается в нуль – показано пунктирными линиями 2, а остальной разрядный промежуток равномерно заполнен плазмой с концентрацией зарядов n_0 , которую можно представить в виде «плато», как показано на рисунке 1 – линия 1. Причем в центре преобладает небольшой положительный заряд, а у катода и анода небольшой отрицательный заряд. В области, где концентрация определяется горизонтальным участком (линия 1 на рисунке 1, а), потенциал определяется горизонтальным участком кривой распределения потенциала u по промежутку (линия 1 на рисунке 1, б). Участки 2 на рисунке 1, б, показанные пунктирными линиями, соответствуют падению потенциала у электродов. Появившееся около электродов между зарядами электрическое поле определяет поток зарядов на электроды при распаде плазмы.

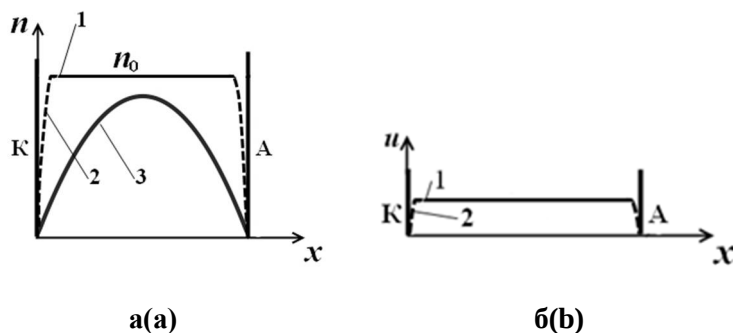


Рисунок 1 – Схема распределения зарядов по промежутку в первый момент времени после снятия импульса возбуждения (а) и распределение потенциала (б)

Figure 1 – Scheme of charge distribution over the interval at a first moment of time after excitation pulse removal (a) and potential distribution (b)

Из характера распределения заряженных частиц в промежутке на начальном этапе распада плазмы можно принять, что анод и катод отделены друг от друга плазмой с постоянной концентрацией. Поэтому процессы около электродов при распаде плазмы протекают на начальной стадии независимо, то есть граница плазмы со стороны катода удалена от анода условно на бесконечность. Процессы в плазме у катода не влияют на процессы у анода. Плазма на начальном этапе является постоянным источником заряженных частиц на электроды диода.

Таким образом, условия для распада плазмы на начальном этапе следующие: начальная концентрация $n(t)|_{t=0} = n_0$; на аноде для $x = 0$ концентрация $n(x)|_{x=0, t>0} = 0$; в плазме для $x = \infty$ концентрация $n(x)|_{x=\infty} = n_0$.

Процесс амбиполярной диффузии при распаде плазмы описывается уравнением

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $\frac{\partial n}{\partial t}$ – изменение зарядов в единице объема; $\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$ – градиент концентрации по оси x .

Для принятых условий задачи решение уравнения диффузии приводит к следующему выражению для концентрации заряженных частиц на анод при распаде плазмы [8]

$$n(x, t) = \frac{2n_0}{\sqrt{4\pi D_a t}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4D_a t}}} e^{-\frac{x^2}{4D_a t}} dx. \quad (2)$$

Дифференцируя выражение (2) по x , для диффузионного потока зарядов на анод при $x = 0$ получаем

$$v(t)|_{x=0} = D_a \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = n_0 \sqrt{\frac{D_a}{\pi t}}. \quad (3)$$

Полученное выражение позволяет рассмотреть основное соотношение, определяющее начальный процесс восстановления обратного напряжения. Из (3) следует, что при $t=0$ поток $v(0)$ должен стремиться к бесконечности. Этот результат математически связан с тем, что при $t=0$ на аноде принято для концентрации $n(x)|_{x=0}=0$, а при $t=0+$ концентрации $n(x)|_{x=0+}=n_0$. Следовательно, возникает и результат $\frac{\partial n(x,t)}{\partial x}|_{x=0}=\infty$ для момента времени $t=0+$. Однако, согласно кинетической теории газов, поток частиц, протекающих через единицу плоской поверхности разрядного промежутка – это величина конечная и определяется выражением [1]

$$v_0 = \frac{n_0 v}{4}, \quad (4)$$

где v – средняя скорость частицы в плазме.

Оценим время t_0 , при котором (или выше которого) изменение потока во времени будет следовать формуле (3). При амбиполярной диффузии скорость движения заряженных частиц определяется главным образом диффузией ионов, то есть длиной их свободного пробега. Из условия $\delta x \approx \Delta x$, а также принимая для значения Δx отрезок, приблизительно равный длине свободного пробега ионов λ_i , получим на момент $t=0+$ для потока

$$v(t=0+)|_{x=0} = D_a \frac{\partial n(x,t)}{\partial x}|_{x=0} = D_a \frac{n_0 - 0}{\lambda_i} = n_0 \sqrt{\frac{D_a}{\pi t_0}}. \quad (5)$$

Откуда для момента t_0 , с которого можно принять правильный результат согласно (3), получаем

$$t_0 = \frac{\lambda_i^2}{\pi D_a}. \quad (6)$$

Коэффициент амбиполярной диффузии определяется выражением [1]

$$D_a = \frac{D_e \mu_i + D_i \mu_e}{\mu_e + \mu_i},$$

где индексы e и i соответствуют электронной и ионной составляющей плазмы.

Так как подвижность электронов μ_e больше подвижности ионов μ_i , а $D_e \mu_i > D_i \mu_e$, для коэффициента амбиполярной диффузии получаем

$$D_a = \mu_i \frac{D_e}{\mu_e}. \quad (7)$$

Используя соотношения Эйнштейна $\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{kT_e}{e}$, $\frac{D_i}{\mu_i} = \frac{kT_i}{e}$ и кинетической теории газов

$D_i = \frac{\lambda_i v_i}{3}$ из [1], для расчёта времени t_0 согласно (6) находим

$$t_0 = \frac{3}{\pi} \left(\frac{T_i}{T_e} \right) \frac{\lambda_i}{v_i}. \quad (8)$$

В выражениях использовались следующие обозначения: k – постоянная Больцмана; D_i и T_i – коэффициент диффузии и температура ионов соответственно; D_e и T_e – коэффициент диффузии и температура электронов, соответственно; e – элементарный электрический заряд (абсолютная величина заряда электрона); v_i – тепловая скорость ионов.

Проведем оценку значения t_0 при давлении водорода $p = 0,1$ мм рт. ст. Для дугового разряда в диоде с накаливаемым катодом можно принять: $v_i = 3 \cdot 10^5$ см/с; $T_e = 40\,000$ К; $T_i = 1000$ К; $\lambda_i = 1/(Q_i p) \approx 1/(100p)$, где Q_i – эффективное поперечное сечение атома газа. При данных числовых значениях, согласно (8), получаем $t_0 \approx 10^{-8}$ с. При времени $t > t_0$ поток на анод будет соответствовать выражению (5).

Но применимость формулы (5) ограничена. В процессе распада плазмы вид распределения концентрации заряда по промежутку постоянно видоизменяется. Через несколько микросекунд распределение вида «плато» переходит в распределение типа «синусоидальной» кривой с максимумом концентрации зарядов по центру разрядного промежутка, как показано на рисунке 1, a – кривая 3 [9]. Поэтому меняются граничные условия задачи, а следовательно, и вид решения уравнения (1) будет другим. Соответственно и выражение для потока на анод изменится.

2. Влияние обратного тока на длительность восстановления напряжения на аноде.

В процессе отключения импульса возбуждения разряда напряжение на аноде на стадии среза проходит в некоторый момент времени через нуль, когда наступит равенство $U = U_{обр}$, и дальше становится отрицательным.

При достижении на аноде напряжения, равного нулю, анод приобретает свойства изолированной стенки. Ток, который протекает в цепи анода при распаде плазмы, записывается в виде $I(t) = I_{ia}(t) + I_{ea}(t)$, где $I_{ia}(t)$ – ионный ток на анод; $I_{ea}(t)$ – электронный ток на анод. Доля электронной составляющей в результирующем обратном токе на анод по мере повышения отрицательного напряжения на аноде постоянно уменьшается. При отрицательном напряжении на аноде около 2 В электронная составляющая становится равной нулю; в обратном токе остаётся только ионная составляющая тока $I_{ia}(t)$. Ток $I_{ia}(t)$ в анодной цепи определяется концентрацией ионов, поступающих на анод из распадающейся плазмы. При напряжении $U_{обр}$ десятки и более вольт напряжение 2 В можно не учитывать и принять приближенно за начало отсчёта время, когда напряжение $U_a(0) \approx 0$.

Процесс нарастания отрицательного обратного напряжения на аноде соответствует снижению напряжения на срезе импульса возбуждения. Для анализа переходного процесса приемлем идеализируемую модель среза импульса напряжения, как говорилось выше, а именно изменение по линейному закону, длительность t_c которого составляет, например, порядка одной микросекунды.

Относительно уровня $U_a(0) \approx 0$ напряжение импульса возбуждения уменьшается со временем согласно выражению $U(t) = U_{обр}(1 - t/t_c)$ и достигнет нуля за время t_c . Отрицательное напряжение на аноде за то же время t_c при этом возрастает также линейно по закону

$U_{aобр}(t) = -U_{обр} \frac{t}{t_c}$. При наличии сопротивления R в анодной цепи ток $I_{ia}(t)$ создаёт на нём

напряжение согласно закону Ома $U(t) = I_{ia}(t)R$. Тогда напряжение $U_a(t)$ на аноде изменяется в соответствии с выражением

$$U_a(t) = -U_{обр} t/t_c + I_{ia}(t)R. \quad (9)$$

При большой проводимости анодной цепи через время t_c выражение для останавливающегося напряжения на аноде имеет вид: $U_a(t) = -U_{обр} + I_{ia}(t)R$ и напряжение $U_a(t)$ будет стремиться к $U_{обр}$ по мере уменьшения тока $I_{ia}(t)$ при распаде плазмы.

3. Послеразрядная проводимость в диодах с накаливаемым катодом.

При значительной разнице значений проводимостей разрядного промежутка и внешней цепи анодный ток в ней будет ограничиваться сопротивлением внешней цепи. Максимальное значение тока в анодной цепи $I_a = U_{обр}/R$ и будет постоянным в течение некоторого промежутка времени. Поэтому при выполнении неравенства $I_{ia}(t) > I_a$ напряжение на аноде приблизительно равно нулю, а следовательно, равно нулю и напряжение на промежутке катод–анод. Промежуток времени, в течение которого напряжение на аноде равно нулю, относится к периоду Δt избыточной послеразрядной проводимости. Восстановление обратного напряжения на аноде теперь протекает через стадию избыточной послеразрядной проводимости и может оказаться больше длительности среза импульса. Стадия заканчивается в момент, когда источник анодного напряжения может развить ток больше тока, поставляемого плазмой на анод в процессе её распада.

Принимая, что на стадии избыточной послеразрядной проводимости распад плазмы следует также диффузионному механизму с нейтрализацией заряженных частиц плазмы

только на электродах диода, концентрация на которых принимается за ноль, из решения уравнения (1) можно получить формулы для тока, поступающего на анод в процессе распада плазмы [9]:

$$I_{ia} = eSD_a n_0 \frac{\pi}{d} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (10)$$

где S – площадь анода.

Из условия равенства тока I_{ia} распадающейся плазмы току внешней цепи $\frac{U_{обр}}{R}$ формула для длительности Δt избыточной послеразрядной проводимости имеет вид

$$\Delta t = \tau \ln \frac{eD_a S \pi R n_0}{d U_{обр}}. \quad (11)$$

Анализ формулы (11) дает следующие результаты. Чем выше проводимость анодной цепи, тем меньше значение длительности Δt , то есть сопротивление во внешней цепи должно быть низким, а напряжение – высоким. Давление на зависимость Δt проявляется через коэффициент D_a . Коэффициент амбиполярной диффузии, в отличие от выражения (7), будет определяться по формуле [10]

$$D_a = 2 \frac{\mu_i}{p} \frac{k}{e} T_i.$$

Коэффициент D_a входит в выражение (1) дважды: через постоянную времени τ и как множитель выражения логарифмической зависимости. Так как логарифмическая функция слабая, то зависимость Δt от давления определяется в основном коэффициентом τ . С повышением давления подвижность ионов μ_i падает, коэффициент D_a уменьшается и соответственно значение Δt увеличивается.

Выполним оценку длительности Δt для диода со следующей геометрией: расстояние анод–катод $d = 1$ см; площадь электродов $S = 10$ см². Постоянные коэффициенты: элементарный электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Диод наполнен водородом при давлении $p_0 = 0,4$ мм рт. ст. Подвижность ионов водорода при давлении 1 мм рт. ст. составляет $\mu_i = 2 \cdot 10^4$ см²/(В·с·мм рт. ст.). Температура электронов в плазме разряда, определяемая напряжением поддержания разряда, составляет десятки тысяч градусов. Электроны, эмитированные катодом, имеют температуру порядка тысячу градусов. И, как показывают расчеты, при спаде тока анода на начале среза импульса быстрые электроны плазмы за время порядка $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с заменяются на медленные катодные электроны. Поэтому при расчете температура катода, газа, ионов и катодных электронов одинакова и равна температуре катода $T = 1000$ К. При этом давление в промежутке оценивается с помощью формулы $p = p_0(273/T)$. Начальную концентрацию заряженных частиц примем $n_0 = 10^{13}$ см³. Для анодной цепи выбираем сопротивление $R = 500$ Ом, напряжение $U_{обр} = 100$ В. В результате расчета получено значение $\Delta t \approx 6$ мкс. Таким образом, возникновение в диоде явления избыточной послеразрядной проводимости может значительно увеличить время восстановления напряжения на аноде диода.

Заключение

Проведён анализ процессов распада плазмы на её начальной стадии в диоде с накаливаемым катодом в момент отключения импульса возбуждения разряда. Определены условия, которые позволили сформулировать задачу распада плазмы на начальной стадии как процесс диффузии потока частиц на анод из неограниченного источника с постоянной концентрацией $n(t)|_{t=0} = n_0$.

Решение уравнения диффузии на начальной стадии распада плазмы показало, что существует короткий промежуток времени длительностью приблизительно 10^{-8} с, когда поток заряженных частиц на анод имеет конечное значение. При дальнейшем распаде плазмы поток частиц на анод уменьшается по законам диффузии.

Обратный ток (поток ионов) на анод при распаде плазмы может оказать влияние на время восстановления обратного напряжения на аноде на этапе среза импульса возбуждения разряда. Показано, что при низкой проводимости анодной цепи за счёт возникающего положительного напряжения на анодном сопротивлении рост обратного напряжения уменьшается вплоть до установки напряжения, равном нулю. При этом распад плазмы в диоде протекает в условиях избыточной послеразрядной проводимости. Анализ процессов позволил выявить факторы, определяющие её длительность, и найти выражение для оценки этого промежутка времени. Выполненная оценка показывает значительное увеличение времени восстановления обратного напряжения на аноде диода в условиях избыточной послеразрядной проводимости.

Библиографический список

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание // Райзер Ю.П. – 3-е изд. перераб. и доп. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 736 с.
2. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники // М.: Высшая школа, 1979. 448 с.
3. Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н. и др. Импульсные водородные тиратроны. – М.: Сов.радио, 1974. 212 с.
4. Арефьев А.С., Гнидо В.Ф., Крестов В.А., Тинина Е.В. Управляющие свойства мелкоструктурных сеток // Изв. Акад. Наук. Серия физическая, 2000, т. 64, вып. 7. С. 1345-1348.
5. Анисимов В.Ф., Киселев Ю.В., Тинина Е.В. Зажигание повторного разряда в защитных разрядниках // Тезисы докладов III Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики. Саранск, 2001. С. 18.
6. Гнидо В.Ф., Киселев Ю.В., Тинина Е.В. Модель процессов послеразрядной проводимости на стадии восстановления обратного напряжения на диоде // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях студентов, молодых ученых и специалистов НИТ – 2000». Рязань, 2000. С. 172.
7. Шумаков С.П. Послеразрядная проводимость в ГРП с накаливаемым катодом // Электронная техника. Сер.4. Электровакuumные и газоразрядные приборы, 1986, вып. 1 (12). С. 11-13.
8. Анисимов В.Ф., Гнидо В.Ф., Лоскутов А.В., Киселев Ю.В., Тинина Е.В. О распределении заряженных частиц при распаде плазмы в условиях равномерного распределения зарядов в промежутке // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2001, вып. 8. Рязань, С. 99-102.
9. Тинина Е.В. Исследование послеразрядных процессов в диодных промежутках с холодным катодом и разработка миниатюрных металлокерамических разрядников среднего давления // Диссертация на соиск. Уч. степени к.т.н. Рязань, 2003, 177 с.
10. Murog A., Gnido V., Tinina E., Anisimova V., Ilchuk I. Plasma decay at low pressure / International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering / IJATCSE. – ISSN 2278-3091. Volume 8, no.6, November – December 2019, article no. 46, p. 2965-2968.

UDC 621.38

FEATURES OF POST-DISCHARGE PROCESSES IN A DIODE AT THE STAGE OF DISCHARGE EXCITATION PULSE DECAY

M. V. Lenkov, Ph.D. (Tech.), associate professor, head of the department, department of automation of information and technological processes, RSREU named after V.F. Utkin, Ryazan, Russian Federation, orcid.org/0000-0002-9553-2047, e-mail: lenkov.m.v@rsreu.ru

E. V. Tinina, Ph.D. (Tech.), Assistant professor, Associate Professor, Department of Automation of information and technological processes, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russian Federation, orcid.org/0000-0001-6846-4192, e-mail: alen-pa14@yandex.ru

From a practical point of view, a number of gas-discharge devices make the important case when the recovery of reverse voltage occurs with a delay due to the phenomenon of excessive post-discharge conduc-

tivity, which is associated with reverse current flow. The paper analyzes the features of post-discharge processes during the restoration of reverse voltage at diode anode with an incandescent cathode at the cut-off stage of excitation pulse. The processes at the initial stage of pulse cutoff are considered simultaneously with the effect of reverse current on the duration of voltage recovery at the anode. The analysis is carried out with the diffusion mechanism of plasma decay. In the course of the work, an expression of particle flow to the anode at the initial stage of post-discharge processes was obtained, a connection between reverse current to the anode and the duration of excitation pulse cutoff was established. The duration of delay in restoring the reverse voltage at diode anode in the case of excessive post-discharge conductivity was also estimated.

Keywords: diode, plasma, decay, current, anode, voltage, recovery, conductivity, delays, duration.

DOI: 10.21667/1995-4565-2024-89-141-148

References

1. **Rajzer Ju.P.** Fizika gazovogo razrjada (Physics of gas discharge). Nauchnoe izdanie. Rajzer Ju.P. – 3-e izd. pererab. i dop. – Dolgoprudnyj: Izdatel'skij Dom «Intellect», 2009, pp. 736. (in Russian).
2. **Sobolev V.D.** Fizicheskie osnovy jelektronnoj tehniki (The physical foundations of electronic technology). M.: Vysshaja shkola, 1979, pp. 448. (in Russian).
3. **Fogel'son T.B., Breusova L.N.** i dr. Impul'snye vodorodnye tiratrony (Pulsed hydrogen thyatrons). – M.: Sov.radio, 1974, pp. 212. (in Russian).
4. **Aref'ev A.S., Gnido V.F., Krestov V.A., Tinina E.V.** Upravljajushhie svojstva melkostrukturnyh setok (Control properties of fine-grained meshes). *Izv. Akad. Nauk. Serija fizicheskaja*, 2000, vol. 64, issue 7. pp. 1345-1348. (in Russian).
5. **Anisimov V.F., Kiselev Ju.V., Tinina E.V.** Zazhiganie povtornogo razrjada v zashhitnyh razrjadnikah (Re-discharge ignition in protective arresters). *Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Fundamental'nye i prikladnye problemy fiziki*. Saransk, 2001, pp. 18. (in Russian).
6. **Gnido V.F., Kiselev Ju.V., Tinina E.V.** Model' processov poslerazrjadnoj provodimosti na stadii vosstanovlenija obratnogo naprjazhenija na diode (A model of post-discharge conduction processes at the stage of reverse voltage recovery on a diode). *Tezisy dokladov Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Novye informacionnye tehnologii v nauchnyh issledovanijah studentov, molodyh uchenyh i specialistov NIT- 2000»*. Rjazan', 2000, pp. 172. (in Russian).
7. **Shumakov S.P.** Poslerazrjadnaja provodimost' v GRP s nakalennym katodom (Post-discharge conductivity in gas-discharge devices with an incandescent cathode). *Jelektronnaja tehnika. Ser.4. Jelektrovakuumnye i gazorazrjadnye pribory*, 1986, issue 1 (12). pp. 11-13. (in Russian).
8. **Anisimov V.F., Gnido V.F., Loskutov A.V., Kiselev Ju.V., Tinina E.V.** O raspredelenii zaryazhenykh chastic pri raspade plazmy v usloviyah ravnomernogo raspredeleniya zaryadov v promezhutke. *Vestnik Ryazanskoj gosudarstvennoj radiotekhnicheskoy akademiiyu*. 2001, vyp. 8. Ryazan', pp. 99-102. (in Russian).
9. **Tinina E.V.** Issledovanie posle razrjadnyh processov v diodnyh promezhutkah s holodnym katodom i razrabotka miniatjurnyh metallokeramicheskikh razrjadnikov srednego davlenija (Investigation of post-discharge processes in diode gaps with a cold cathode and development of miniature metal-ceramic medium-pressure dischargers). *Dissertacija na soisk. Uch. stepeni k.t.n.* Rjazan', 2003. pp. 177. (in Russian).
10. **Murog I.A., Gnido V.F., Tinina E.V., Anisimova V.A., Il'chuk I.A.** Raspad plazmy pri nizkom davlenii (Plasma decay at low pressure). *Mezhdunarodnyj zhurnal peredovyh tendencij v oblasti komp'juternyh nauk i inzhenerii*. IJATCSE. – ISSN 2278-3091, vol. 8, no. 6, nojabr' – dekabr' 2019, stat'ja no. 46, pp. 2965-2968. (in Russian).