

УДК 537.525.5 : 533.932

ДИНАМИЧЕСКИЕ ДВОЙНЫЕ СЛОИ В СИЛЬНОТОЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДИОДАХ

Е. И. Луценко, Н. Д. Середа, А. Ф. Целуйко

Экспериментально исследуются особенности формирования и поведения динамических двойных слоев (ДС) в сильнотоочных ($I_p \sim 1 \div 20$ кА) протяженных ($l \sim 100$ см) плазменных ($n \sim 10^{12} \div 5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$) диодах при низком давлении газа ($p \sim 10^{-5} \div 10^{-3}$ Тор) в однородном магнитном поле. Установлено существование двух типов ДС: *K*- и *M*-слоя, поддерживаемых различными физическими процессами. Показано, что в условиях, когда плазма не заполняет все сечение диода, ДС помимо тока формирования I_k характеризуется еще дополнительными токовыми параметрами I_{1-4} . Выявлены физическое различие между *K*- и *M*-слоями и причины появления дополнительных токовых параметров. Показано, что пространственной локализацией и параметрами ДС (током, падением потенциала и длительностью существования) можно управлять.

Введение

Динамические двойные слои (ДС) объемного заряда играют важную роль в процессах прохождения тока в сильнотоочных ($I_p \sim 10 \div 100$ кА) плазменных диодах при низком давлении газа ($p \sim 10^{-5} \div 10^{-3}$ Тор).

Прежде всего они выполняют защитную функцию плазмы: при попытке пропустить через диод ток выше критического значения [1]

$$I_k \sim en \sqrt{2T_{e0}/m_e} S, \quad (1)$$

максимально возможного для токонесущей плазмы, последняя, защищая свое существование, сбрасывает вызывающее ток электрическое поле в образуемый ею двойной слой объемного заряда с сохранением квазинейтральности по обе стороны слоя. Большое сопротивление ДС регулирует в дальнейшем величину тока диода на уровне, обеспечиваемом параметрами плазмы

$$I_p = \frac{1.86}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{m_e} \frac{V_{ca}^{3/2}}{l_{ca}^2}} S \sim en \left(v_{ca} \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} + \alpha \sqrt{\frac{2T_{e0}}{m_e}} \right) S, \quad (2)$$

где n — концентрация плазмы; T_{e0} — температура ее электронов; V_{ca} — падение потенциала в слое; l_{ca} — среднее по сечению значение толщины ДС; S — площадь токового канала; v_{ca} — скорость движения слоя, включающая и скорость его расширения dl_{ca}/dt [2] при быстром увеличении падения напряжения ($dV_{ca}/dt > 2.5 \cdot 10^8$ В/с) в слое [3]; α — доля скорости ионного звука, приобретаемая ионами, поступающими в ДС. Увеличение тока в этом случае возможно лишь за счет расширения токового канала и увлечения в перенос тока дополнительного числа заряженных частиц. В отсутствие этих возможностей падение потенциала в ДС возрастает практически до действующей в цепи эдс вследствие быстрого расширения ДС и возрастания его активного сопротивления.

Вместе с тем ДС с высоким падением потенциала ($V_{ca} \sim V_p$) создает эффективный механизм передачи энергии внешнего электрического поля, а также энергии, запасенной в цепи тока, в кинетическую энергию пучков заряженных

частиц (электронов и ионов), переносящих весь ток диода. Такие пучки неоднократно наблюдались в экспериментах с плазменными диодами [4-8]. Недавно таким механизмом был получен [9] электронный пучок с током ~ 100 кА и энергией ~ 2 МэВ.

В свою очередь интенсивные пучки заряженных частиц, коллективно взаимодействуя с пронизываемой ими плазмой, создают условия для весьма длительного существования динамических ДС и сопровождающих их процессов. В результате возникает замкнутый цикл взаимобусловленных процессов, включающий в себя и процессы эмиссии электронов с холодного катода, приводящий к возникновению особой сильноточной формы самостоятельного электрического тока в газе — самостоятельного плазменно-пучкового разряда [10], все процессы которого поддерживаются электрическим полем, создаваемым поданным на электроды напряжением.

В последнее время динамические ДС интенсивно изучаются в связи с использованием их в сильноточной импульсной технике в качестве сильноточных прерывателей тока в системах с индуктивными накопителями энергии [9, 11].

Возникновение и перемещение динамического ДС ранее исследовалось в экспериментах [12] при сравнительно небольших токах ($I_p < 1$ кА). Однако выполненные в последнее время эксперименты [13, 14] при токах разряда до $I_p \sim 20$ кА выявили новые особенности этого важного явления. В частности, вместо одного движущегося ДС установлено существование двух типов ДС, отличающихся поддерживающими их процессами, и пространственно-разнесенный переход одного типа ДС в другой. Существование двух типов ДС вызвано тем обстоятельством, что динамический ДС возникает в той области диодного промежутка, где прохождение тока наиболее затруднено, — в области минимума концентрации плазмы n_m по длине. Такой областью чаще всего оказывается область вблизи катода на стыке плотной плазмы ($n_k \sim 10^{15} \div 10^{17}$ см $^{-3}$) катодных пятен с более разреженной плазмой ($n \sim 10^{12} \div 10^{13}$ см $^{-3}$) диодного промежутка либо область в межэлектродном пространстве, разрежение плазмы в которой имеет место вследствие ее начального создания или из-за невозможной потери заряженных частиц в процессе протекания тока и пространственно-неравномерной скорости их генерации. В соответствии с этим можно различать два типа динамических ДС: *K*-слой, формирующийся на фронте плазмы катодных пятен [13], и *M*-слой, формирующийся в межэлектродном промежутке [14]. В настоящей работе исследуются особенности их формирования и поведения в широкой области изменения начальных условий.

1. Методика эксперимента

Схема эксперимента приведена на рис. 1, а. В камере ($l=150$ см, $D=12$ см) из стекла, находящейся в однородном магнитном поле $H \sim 2$ кЭ, кратковременной инжекцией электронного пучка через затянутое сеткой отверстие ($d=3$ см) в торцевом цилиндрическом катоде создавалась высокоионизованная плазма ($n \sim 10^{12} \div 5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, $T_{e0} \sim 15$ эВ, $d_0 \sim 3$ см) при давлении газа $p \sim 10^{-5} \div 10^{-3}$ Тор. Сильноточный ($I_p \sim 1 \div 20$ кА) разряд возбуждался после окончания инжекции пучка приложением напряжения $V_0 \sim 2 \div 20$ кВ от конденсатора $C=3.0$ мкФ между катодом и сетчатым анодом, в котором имелись отверстия для прохождения датчиков, предназначенных для измерения параметров начальной плазмы, распределения потенциала в приэлектродных областях и тока по сечению разряда. В значительном числе опытов сетка в катодном отверстии отсутствовала.

Величина начальной концентрации плазмы и ее распределение по длине регулировались напуском газа в катодную или в анодную область диода. Значения параметров n и T_{e0} начальной плазмы определялись с помощью подвижного двойного зонда. Контроль за концентрацией плазмы в процессе сильноточного разряда осуществлялся с помощью СВЧ диагностики на длинах волн 3 и 8 мм. По току двойного зонда оценивалась и концентрация плотной прикатодной плазмы n_k , генерируемой катодными пятнами. В этом случае вместо заземленного сетчатого электрода \mathcal{Z} устанавливался электрод типа *б* или *в* и менялась полярность подаваемого на электроды напряжения.

Измерение распределения потенциала по длине $V(z, t)$ проводилось с помощью четырех внешних емкостных зондов. Распределение потенциала в приэлектродных областях измерялось с помощью двух внутренних емкостных зондов и двойного зонда.

Распределение тока по сечению измерялось пятью коллекторами, устанавливаемыми в отверстия анода по диаметру на расстоянии 2 см друг от друга. Измерение токов i_{1-5} проводилось одновременно с током разряда поясами Роговского с помощью системы многолучевой регистрации.

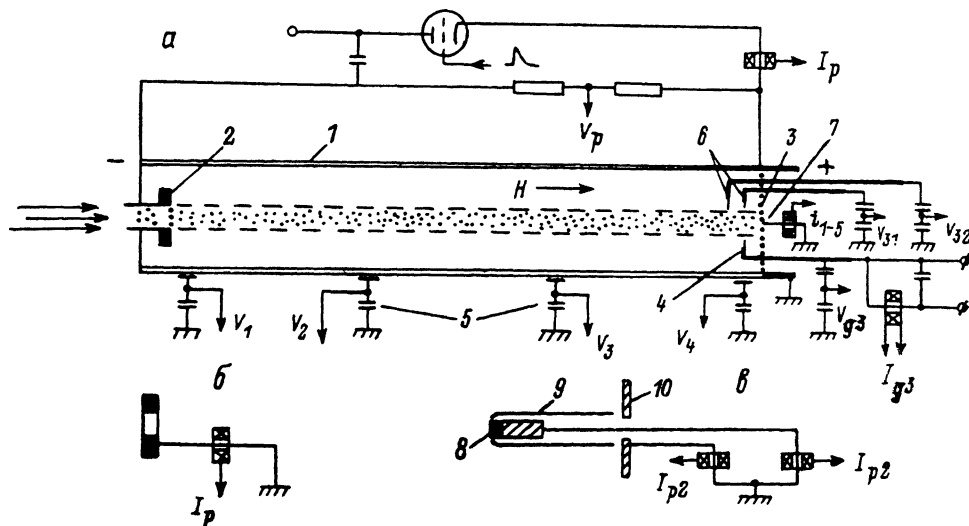


Рис. 1. Схема эксперимента (а), катод с отверстием (б) и катод малого радиуса (в).

1—камера, 2—катод, 3—анод, 4—двойной зонд, 5—внешние емкостные зонды, 6—внутренние емкостные зонды, 7—торцевые коллекторы, 8—центральный токоприемник, 9—экран, 10—периферийный токоприемник.

2. Потенциальные структуры сильноточного плазменного диода

В зависимости от начальных условий: плотности плазмы (давления плазмообразующего газа), формы ее распределения по длине, напряжения питания, диаметра плазменного шнура и камеры, геометрии катода и других факторов в плазменном диоде возможно установление трех различных потенциальных структур.

При большой плотности плазмы ($n > 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $p > 10^{-3} \text{ Тор}$) и относительно низком напряжении питания ($V_0 < 20 \text{ кВ}$) в диоде устанавливается равномерное распределение потенциала на индуктивности L_p плазменного шнура, характерное для сильноточного дугового разряда с малым активным сопротивлением ($R < \rho = \sqrt{L/C}$, L — индуктивность цепи тока). Максимальная величина тока диода в этом случае не зависит от параметров (n , T_{e0}) начальной плазмы, а определяется параметрами цепи $I_{\text{дм}} \sim I_0 = V_0/\rho$. Мгновенные значения тока и напряжения такого дугового разряда определяются соотношениями: $I_x \sim I_0 \sin \omega t$, $V_x \sim V_{01} \cos \omega t$ ($V_{01} = L_p V_0/L$, $\omega = 1/\sqrt{LC}$). Характеристики $I_x(t)$ и $V_x(t)$, полученные в диоде (рис. 1, а) при $p \sim 6 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$ и $V_0 = 8 \text{ кВ}$, приведены на рис. 2, а штрихпунктиром.

Прохождение тока в диоде с более низкой плотностью плазмы сопровождается помимо установления равномерного распределения потенциала возникновением потенциальной структуры динамического двойного слоя. На рис. 2, а представлены осциллограммы тока и напряжения диода при $V_0 = 8 \text{ кВ}$, $n \sim 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и полученные из них зависимости сосредоточенного в ДС активного сопротивления $R_{\text{с.а}} = (V_p - L dI_p/dt)/I_p$ и падающего на нем напряжения $V_{\text{с.а}} = I_p R_{\text{с.а}}$. На осциллограмме $I_p(t)$ помимо критического тока $I_{\text{к}}$

Обозначены дополнительные дополнительные токовые параметры I_{1-4} и соответствующие им времена t_{1-4} . Осциллограммы b , полученные одновременно с a , отражают динамику поведения потенциала в диоде в стадии формирования ДС, а зависимости v показывают распределение потенциала для моментов времени $t \sim 0$, $t \sim t_1$, $t \sim t_2$ и $t \sim t_3$. Анализ рис. 2 выявляет тесную связь характерной скоростью тока κ с распределением потенциала в диоде. Так, до $t < t_\kappa$ $I_p(t)$ совпадает с $I_d(t)$ — потенциал практически линейно распределен по длине (рис. 2, e). По достижении током значения I_κ скорость роста тока замедляется с одновременным повышением напряжения на электродах — в диоде появилось заметное активное сопротивление. Показания зондов V_{1-3} с момента времени t_κ отмечают перестройку потенциала: их сигналы быстро уменьшаются к нулевому

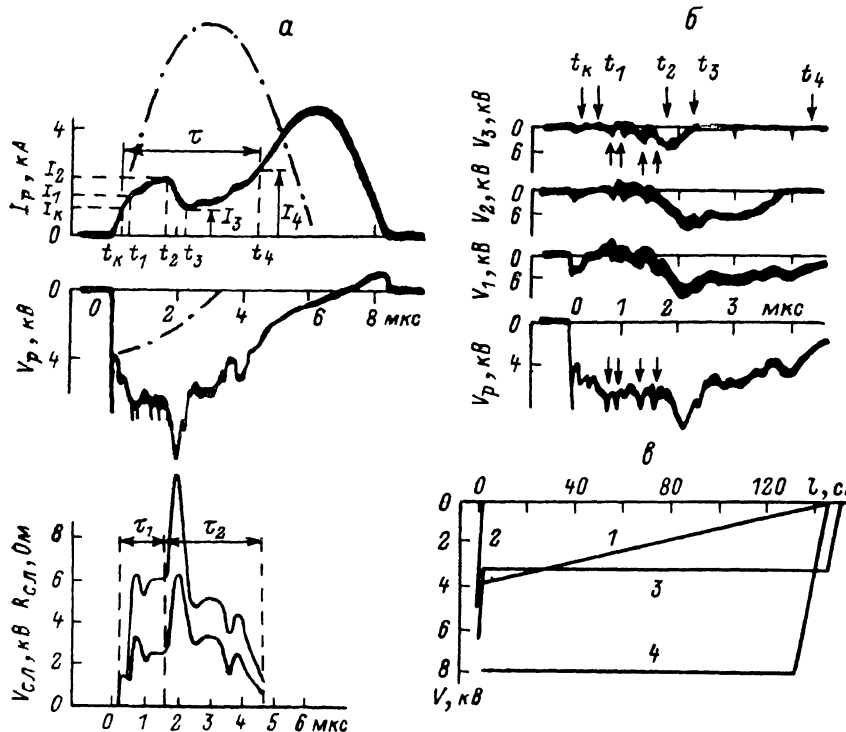


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения и полученные из них зависимости $R_{сл}(t)$ и $V_{сл}(t)$ (а); осциллограммы напряжения на электродах V_p , сигналы V_{1-3} емкостных зондов, отмечающих потенциал плазмы соответственно на расстояниях 3, 130 и 145 см от катода (б); распределение потенциала в диоде (в) для моментов времени $t \sim 0$ (1), $t \sim t_1$ (2), $t \sim t_2$ (3), $t \sim t_3$ (4).

значению, что свидетельствует о сосредоточении потенциала в прикатодной области в слое $l_{ок} < 3$ см. Формируется К-слой. Образование К-слоя не останавливает роста тока. За счет вовлечения в перенос тока новых частиц ток продолжает увеличиваться, хотя и с меньшей скоростью, но при значении I_1 возникает более сильное ограничение тока, а затем практически линейный его рост до значения I_2 . Потенциал в течение этого времени $\tau_1 = t_2 - t_\kappa$ сосредоточен в К-слое (рис. 2, в), и линейный рост тока со скоростью $dI_p/dt < V_0/L$ на начальной стадии тока в диоде является внешним показателем формирования К-слоя.

Уже на этапе существования К-слоя вблизи анода в слое $l_{ок} < 5$ см начинает формироваться М-слой (время его зарождения отмечено стрелками). Потенциал из К-слоя быстро перераспределяется в М-слой, но какое-то время в диоде существуют одновременно два различного типа ДС (рис. 2, в). По достижении током значения I_2 наблюдается резкое его уменьшение до величины I_3 , сопровождающееся ростом потенциала М-слоя выше напряжения питания и его отходом от анода в глубь диодного промежутка (рис. 2, в). Резкое уменьшение (срыв) тока до уровня I_3 может служить внешним признаком оконча-

тельного формирования M -слоя. Длительность существования M -слоя $\tau_2 = t_4 - t_2$. К моменту времени t_4 сопротивление M -слоя (рис. 2, а) уменьшается до значения $R < \rho$ и потенциал снова начинает распределяться по индуктивным элементам цепи.

Таким образом, в плазменном диоде в условиях рис. 2 последовательно, сменяя друг друга, формируются три потенциальные структуры с условными границами, показанными на зависимостях $R_{c1}(t)$ и $V_{c1}(t)$ пунктирными линиями.

При формировании динамических ДС всегда выполняется последовательность: сначала образуется K -слой, а затем M -слой. Но можно реализовать условия, когда K -слой или M -слой не образуются. Точно так же, варьируя начальными условиями, можно управлять параметрами K - и M -слоя: током (сопротивлением), потенциалом и длительностью, а следовательно, и параметрами ускоряемых в слое интенсивных пучков заряженных частиц.

3. K -слой

Формирование K -слоя с преобладающим временем существования ($\tau_1 > \tau_2$) происходит в основном при относительно низком напряжении питания ($V_0 < < 10-15$ кВ) в условиях спадающей к катоду плотности плазмы ($n_1/n_2 < 1$; n_1 — плотность, измеренная на расстоянии 3 см от катода; n_2 — на расстоянии 5 см от анода), а также в условиях $n_1/n_2 > 1$ при катоде малого размера

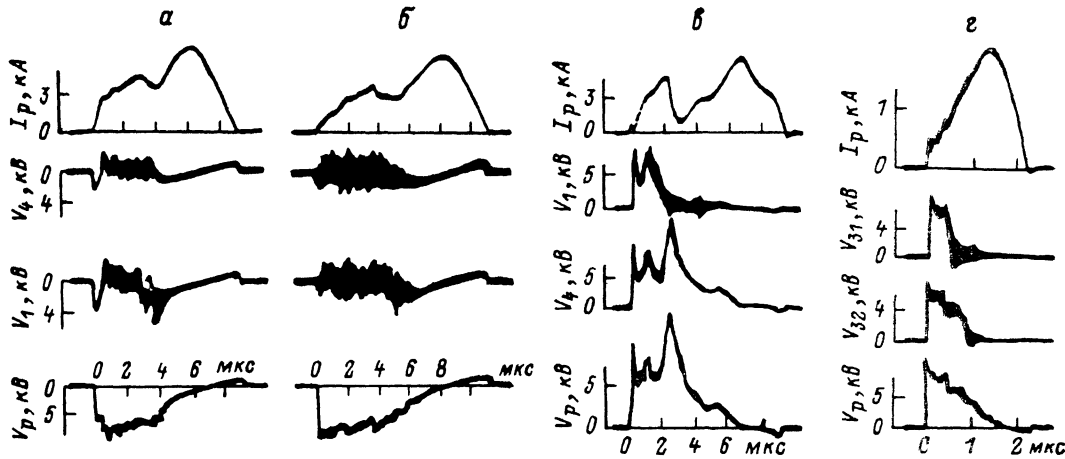


Рис. 3. Осциллограммы I_p , V_p и сигналы V_1 , V_{41} зондов, установленных возле катода и анода при $n_1/n_2 < 1$, $n_1 \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $V_0 = 10$ кВ (а, б); то же, с катодом рис. 1, б и $n_1/n_2 > 1$ (заземлен катод) (в); осциллограммы I_p и V_p и сигналы V_{31} и V_{32} внутренних емкостных зондов. $C = 0.4$ мкф, $V_0 = 10$ кВ, $n_1 \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (г).

(рис. 1, в) и катоде, имеющем по оси отверстие (рис. 1, б). В последних двух случаях, а также в определенных условиях и при катоде рис. 1, а критический ток I_x формирования K -слоя оказывается очень малым, не соответствующим измеряемой плотности плазмы n_1 .

Особенности преимущественного формирования K -слоя иллюстрирует рис. 3. Осциллограммы а, б получены при одних и тех же начальных параметрах: V_0 , n_1 , n_1/n_2 , но в случае а значение I_x соответствует измеряемой концентрации n_1 , а в случае б оно значительно ниже. Дополнительными исследованиями концентрации начальной плазмы в прикатодной области диода установлено, что условия а соответствуют малому градиенту плотности плазмы, а условия б — большому. В обоих случаях обращает на себя внимание то обстоятельство, что в течение времени существования K -слоя он остается локализованным в области между катодом и первым емкостным зондом, а также то, что все это время в анодной плазме наблюдаются колебания потенциала

(порядка киловольт) с частотой $f \sim 1 \div 50$ МГц, отмечаемые всеми емкостными зондами.

Осциллограммы ϵ , ζ получены в условиях $n_1/n_2 > 1$ и катоде рис. 1, б при измерении $V(z, t)$ относительно заземленного катода. При этом, как и в случае б, наблюдается очень низкое значение I_{κ} ($\sim 100 \div 200$ А), т. е. стадия дугового разряда оказывается очень малой и K -слой формируется практически с момента возникновения тока. Осциллограммы ϵ отмечают начальное сосредоточение потенциала в прикатодной области, его повышение при достижении током значения I_1 и последующее быстрое уменьшение потенциала в этой области при сохранении большого значения в анодной области диода. Таким образом, в условиях $n_1/n_2 > 1$ исчезновение K -слоя начинается по возобновлении роста тока после ограничения его значением I_1 и заканчивается в момент достижения значения I_3 . Момент времени t_2 можно считать временной границей перехода от K - к M -слою. Длительность $\tau_1 = t_2 - t_{\kappa}$ с повышением V_0 быстро уменьшается и относительно медленно возрастает с увеличением n . Величины I_{κ} , I_1 , I_2 линейно растут с n и мало зависят от значения V_0 .

Пространственное поведение K -слоя отражают осциллограммы ζ , где потенциал плазмы измерялся внутренними емкостными зондами, установленными на расстоянии 1 и 2 см от катода. Совпадение потенциалов зондов V_{31} и V_{32} с потенциалом V_p означает, что первоначально практически все приложенное к электродам напряжение сосредоточено в прикатодном слое толщиной менее 1 см. Последовательное исчезновение сигналов на зондах 1 и 2 отмечает движение K -слоя от катода со скоростью $v_{c1} \sim 2 \cdot 10^6$ см/с.

Исследование внутренними зондами пространственной структуры K -слоя показало, что на начальной стадии в условиях б—г (при малом значении I_{κ}) он не представляет собой единого целого, а состоит из большого числа элементарных ДС, образующихся вокруг расширяющейся плазмы каждого катодного пятна. Сливаясь вследствие перекрытия плазменных образований катодных пятен, элементарные ДС образуют сложную движущуюся от катода пространственную структуру, изучение которой требует дополнительных методов диагностики.

4. M -слой

В условиях, когда плазма не заполняет все сечение диода ($d_0 < D$), M -слой формируется, как правило, после предшествующей ему стадии существования K -слоя. Продольная локализация M -слоя определяется формой распределения $n(z)$, а его параметры: I_{c1} , V_{c1} , τ_2 значениями n , V_0 . С повышением V_0 значения V_{c1} и τ_2 увеличиваются, а с ростом плотности плазмы уменьшаются. Точковые параметры: I_2 , I_3 , I_4 с повышением плотности плазмы линейно растут. При $n_1/n_2 > 1$ M -слой образуется в анодной области диода, при $n_1 \sim n_2$ в центральной части, а при $n_1/n_2 < 1$ в катодной. Для образования M -слоя в катодной области диода необходимы достаточно высокие значения n и V_0 ($n_1 \geq 5 \times 10^{12}$ см $^{-3}$, $V_0 \geq 10 \div 15$ кВ).

Особенности формирования и поведения M -слоя в различных условиях иллюстрирует рис. 4 (момент зарождения M -слоя отмечен стрелками). Осциллограммы а получены при $n_1/n_2 \sim 2$ с катодом рис. 1, б, что определяет низкое значение I_{κ} формирования K -слоя и последующий линейный рост тока. В данном случае отсутствует дополнительный токовый параметр K -слоя I_1 , который появляется лишь при достаточно большой скорости роста тока (dI_p/dt), определяемой значением V_0 . Как и в случае рис. 2, M -слой зарождается в прианодной области на стадии существования K -слоя при приближении величины тока к значению I_2 . Образование M -слоя сопровождается быстрым уменьшением тока диода. Поэтому падающее в слое напряжение $V_{c1} = V_p - L dI_p/dt$ существенно превышает напряжение, приложенное к электродам.

Осциллограммы б показывают формирование M -слоя в диоде с катодом рис. 1, а при более высоком напряжении питания, что обеспечило большую длительность существования M -слоя. В этом случае M -слой, зародившись вблизи анода, в дальнейшем отходит ближе к центру, где и остается довольно длительное время с ограниченным перемещением к центру и к аноду соответственно в моменты кратковременного возрастания и спада тока.

Осциллограммы v отражают поведение M -слоя в диоде с катодом рис. 1, б при $n_1/n_2 < 1$. В этом случае переход от K -к M -слою происходит без изменения места локализации ДС. K -слой переходит в M -слой по мере его удаления от

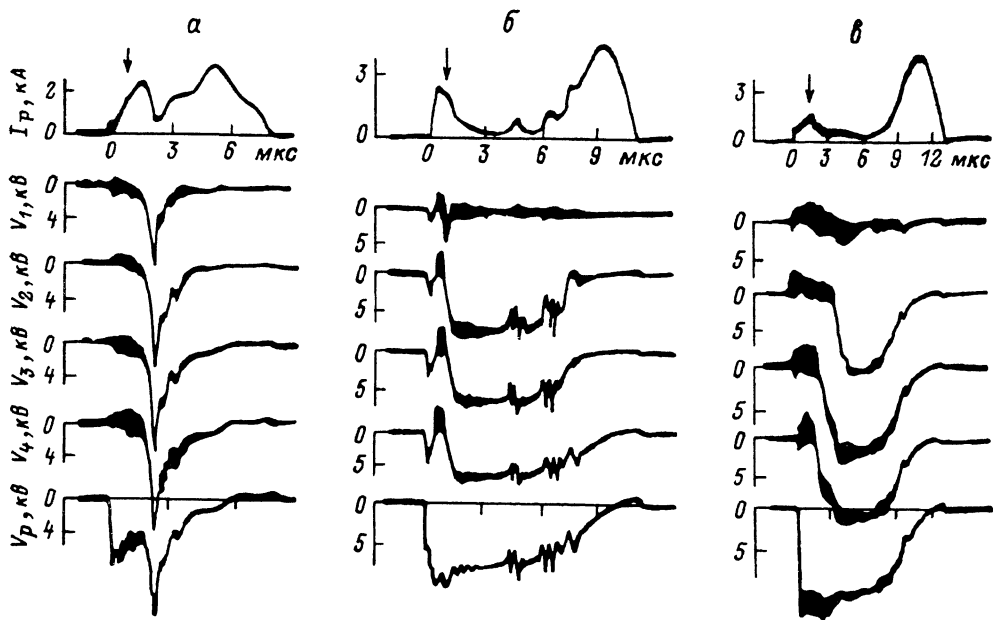


Рис. 4. Осциллограммы I_p , V_p и сигналы V_{1-4} зондов, установленных на расстояниях 3, 20, 100 и 140 см от катода $n_1/n_2 > 1$ (а, б) и на расстояниях 3, 8, 23 и 45 см от катода $n_1/n_2 < 1$ (в).
 а — $n_1 \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $V_0 \sim 8 \text{ кВ}$; б — $n_1 \sim 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $V_0 \sim 10 \text{ кВ}$; в — $n_1 \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $V_0 \sim 10 \text{ кВ}$.

катода. Внешне этот переход выглядит так же, как и ранее: при формировании M -слоя наблюдаются уменьшение тока и повышение напряжения на электродах. Однако анализ осциллограмм V_1, V_{1-4} показал, что в этот момент наблю-

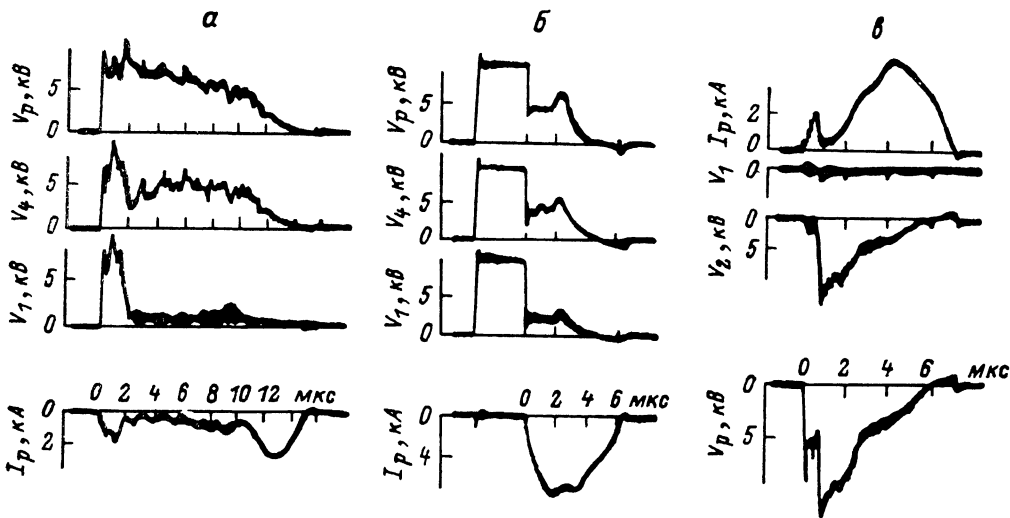


Рис. 5. Осциллограммы I_p и V_p и сигналов $V_{1, 4}$ зондов, установленных вблизи катода и анода (а, б), и сигналов $V_{1, 2}$ зондов, установленных по разные стороны скачка размеров камеры (в).
 $V_0 \sim 10 \text{ кВ}$, $n_1 \sim 3 \cdot 10^{12}$ (а), $4 \cdot 10^{12}$ (б) и $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ (в).

дается также резкое увеличение скорости движения ДС от $v_{с.к} \sim (1 \div 2) \cdot 10^6 \text{ см/с}$ при K -слое до $v_{с.л} \sim (8 \div 10) \cdot 10^6 \text{ см/с}$ при M -слое. Осциллограммы v также показывают, что с момента образования ДС анодная плазма, через которую

проходит ускоренный в нем электронный пучок, имеет положительный потенциал ($V_{пл} \sim -1-2$ кВ) потенциал относительно анода.

Важную информацию о формировании динамических ДС дает рис. 5. Осциллограммы *a, б* получены при заземленном катоде, а осциллограммы *в* — аноде. Осциллограммы *a*, полученные в условиях, близких к рис. 4, б, но с катодом рис. 1, б, показывают как пространственный переход от *K*- к *M*-слою, так и отход *M*-слоя от анода. Кроме того, они показывают наличие положительного потенциала несколько сот вольт между катодной плазмой и катодом в условиях, когда *M*-слой находится вдали от катода в анодной части диода.

В условиях, когда плазма заполняет все сечение диода, возможно формирование *M*-слоя без предварительного формирования *K*-слоя. Такой случай отражает рис. 5, б, где сильноточный разряд возбудился с весьма значительной задержкой, в течение которой диаметр плазменного столба увеличился до диаметра катода высоковольтным тлеющим разрядом. Это сказалось на отсутствии прикатодных процессов ограничения тока, а следовательно, и *K*-слоя.

Осциллограммы *в* показывают формирование ДС в диоде при наличии резкого изменения размеров камеры от $D_k=12$ см до $D_a=6$ см. В этом случае *M*-слой оказывается «привязанным» к месту перехода размеров.

5. Распределение тока по сечению

Динамику поведения токового канала в условиях существования ДС при $n_1/n_2 > 1$ отражают осциллограммы и зависимости рис. 6. Анализ подобных осциллограмм и зависимостей для широкого диапазона изменения начальных

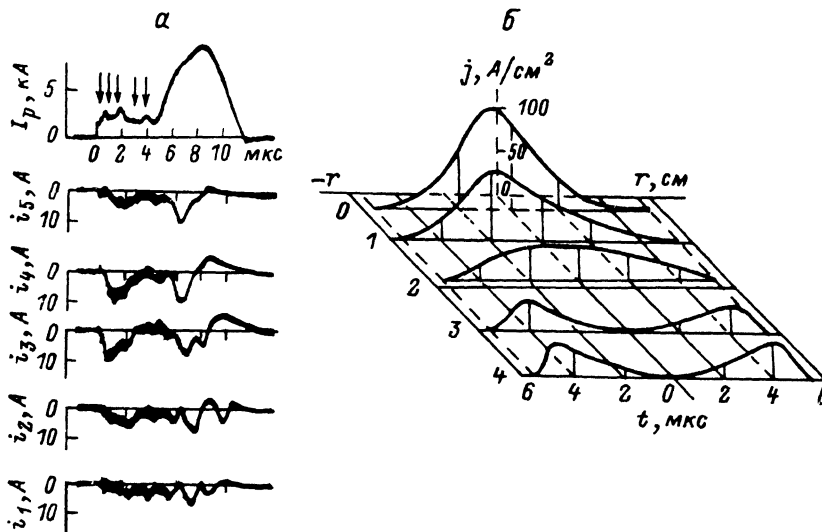


Рис. 6. Осциллограммы I_p и токов i_{1-5} коллекторных зондов и полученные из них для моментов, отмеченных стрелками, зависимости $j(r, t)$. $V_0=14$ кВ, $n_1 \sim 4 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$.

условий показал, что токовый канал первоначально формируется в приосевой наиболее плотной части плазменного столба. Плотность тока в этой части быстро нарастает и к моменту t_1 достигает максимального значения, после чего уменьшается. Одновременно с ростом плотности тока происходит расширение токового канала, который к моменту t_2 заполняет все сечение начального плазменного шнура $S_0=\pi d_0^2/4$. В дальнейшем токовый канал продолжает расширяться, но плотность тока в нем быстро уменьшается и перераспределяется в периферийную зону сечения. К моменту t_3 токовый канал заполняет практически с равномерной плотностью все сечение камеры $S_1=\pi D^2/4$. В дальнейшем плотность тока продолжает уменьшаться, особенно быстро в приосевой части диода. В результате, начиная с момента t_3 , распределение тока по сечению

становится тубчатым. В значительном числе случаев наблюдается несимметричное распределение тока по сечению.

Разность времен $t_2 - t_1$ определяет скорость v_r расширения плазменного шнура $v_r \sim (2 \div 5) \cdot 10^6$ см/с от $d_0/2$ до $D/2$. С повышением V_0 и уменьшением n скорость v_r увеличивается.

Расширение токового канала и уменьшение плотности тока происходят одновременно с уменьшением концентрации анодной плазмы. Однако оценка погонного числа $N = nS$ заряженных частиц показывает, что имеет место не просто диффузионное расширение плазменного столба, но и увеличение N , которое продолжается до $t \sim t_2$. В дальнейшем N уменьшается в случае $n_1/n_2 > 1$ быстро (в 3—5 раз ко времени t_2) и более медленно при $n_1/n_2 < 1$. Ко времени t_4 плотность плазмы снова начинает быстро увеличиваться.

6. Обсуждение результатов и выводы

Полученные результаты выявили ряд новых факторов, важных для установления процессов, приводящих к формированию и поддержанию динамических ДС в сильноточных плазменных диодах. Основные из них следующие.

а) Оказалось, что в условиях, когда плазма не заполняет все сечение диода, возникновение ДС при $I_p \sim I_k$ не ограничивает полностью роста тока диода. В этом случае помимо I_k ДС характеризуются еще дополнительными токовыми параметрами I_{1-4} , которые подчинены функциональной связи, выражаемой соотношением (2).

б) Из результатов следует, что возникающий вблизи катода K -слой по своим характеристикам существенно отличается от образующегося вдали от катода M -слоя. Внешне это различие проявляется в том, что K -слой, движущийся от катода с относительно низкой скоростью ($v_{c,1} \sim (1 \div 5) \cdot 10^6$ см/с), всегда локализован в прикатодной области, не превышающей 10 см, в то время как M -слой перемещается с гораздо большей скоростью ($v_{c,1} \sim (5 \div 10) \cdot 10^6$ см/с) на значительное расстояние (50—100 см) вдоль плазменного столба (рис. 4, в). Кроме того, в определенных условиях K -слой формируется с низким значением I_k , не соответствующим измеряемой плотности плазмы. Что проявляется в экспериментах с катодами малого размера (рис. 1, в), с плазмой со спадающей к катоду плотностью (рис. 3, б), а также с катодом рис. 1, б в условиях $n_1/n_2 > 1$ (рис. 4, а), когда можно было ожидать формирования M -слоя без предварительного образования K -слоя. Различие заключается и в том, что образованию K -слоя предшествует стадия дугового разряда (т. е. достижение значения I_k происходит в условиях увеличения токовой скорости электронов плазмы до тепловой), а формирование M -слоя осуществляется как на некотором этапе развития дугового разряда (рис. 5, б), так и в случае, когда ток разряда переносится пучком электронов, сформированным в K -слое (рис. 4) при превышении током пучка значения I_k для анодной области.

в) Наблюдалось движение M -слоя в анодную плазму с положительным градиентом плотности начальной плазмы. Ранее [12] отмечалось перемещение ДС лишь в направлении более разреженной плазмы.

г) Оказалось, что помимо падения потенциала в ДС в диоде имеются весьма высокие приэлектродные падения потенциала (рис. 4, в; 5, а).

Анализ этих факторов позволяет установить физические процессы, приводящие к формированию и поддержанию K - и M -слоев. Так, исходя из п. «б» и учитывая то, что токовый канал в диоде первоначально привязан к катоду в приосевой наиболее плотной части плазменного шнура, низкое значение I_k формирования K -слоя можно объяснить неблагоприятными условиями взаимодействия плазмы диодного промежутка с катодом, обусловленными тем, что катодные пятна возникают не по всей площади соприкосновения плазмы с катодом, а в местах повышенной плотности плазмы. Вследствие этого возникающие у катода электрические поля и обеспечиваемые плазмой ионные токи генерируют первоначально малое число катодных пятен и эффективная площадь $S_{эфф}$ взаимодействия плазмы диодного промежутка с плазмой катодных пятен оказывается небольшой. Поэтому оказывается малой и величина критического тока формирования K -слоя даже при повышенной плотности плазмы в катодной

части диода. Последующее расширение плазмы катодных пятен поперек магнитного поля и генерация пучково-плазменным взаимодействием плазмы в прилегающих к токовому каналу слоях увеличивают $S_{эфф}$ и число катодных пятен, обеспечивая линейный рост тока K -слоя (рис. 4, а). Подтверждением этому служит то обстоятельство, что установка в катодное отверстие сетки (рис. 1, а) повышает I_k до значения, определяемого соотношением (1).

В отличие от K -слоя M -слои образуются вследствие дефицита заряженных частиц в самом плазменном столбе в условиях или когда прикаатодные процессы ограничения тока не проявляются (рис. 5, б) и появлению M -слоя предшествует дуговой разряд с переносом тока всеми заряженными частицами плазмы, или когда из K -слоя в анодную плазму инжектируется интенсивный электронный пучок (т. е. когда ток разряда переносится небольшой группой частиц, $n_p \ll n_n$), такой, что его ток превышает I_k для анодной плазмы.

Образование M -слоя при инжекции пучка из K -слоя во многом сходно с возникновением виртуального катода в пучково-плазменном разряде с внешней инжекцией пучка [15], но отличается тем, что потенциалы границ плазмы, в которой формируется M -слой, не фиксируются внешними условиями. Это приводит к тому, что в нашем случае в области ограничения тока отсутствует V -образная форма распределения потенциала, которая возникает при инжекции электронного пучка в плазму, концы которой находятся под одинаковым потенциалом. Вместо этого происходит перераспределение напряжения из K -слоя в M -слой. При этом в течение некоторого времени существуют два «включенных» последовательно ДС, при котором падение напряжения из одного слоя переходит во второй.

Выявление процессов, приводящих к формированию K - и M -слоев, совместно с результатами изучения распределения тока по сечению позволяет установить причины возникновения дополнительных токовых параметров ДС I_{1-4} . Так, ограничение тока величиной I_1 можно объяснить вовлечением в перенос тока всех заряженных частиц, поступающих в K -слой по сечению $S_0 = \pi d_0^2/4$, и недостаточной скоростью их генерации в этом сечении. Дальнейший рост тока (при $t > t_1$) вызывается ионизацией и вовлечением в перенос тока прилегающих к плазменному столбу слоев нейтрального газа. В этих условиях токовый параметр I_2 и последующее ограничение тока, приводящее к формированию M -слоя, вызываются истощением нейтральной компоненты, необходимой для обеспечения достаточной скорости генерации носителей заряда, во всем сечении диода $S_1 = \pi D^2/4$. Токовый параметр I_3 определяется балансом скоростей поступления нейтральных частиц, их ионизации и ухода из разряда. Свидетельством этому является резкое уменьшение концентрации плазмы, перераспределение тока по сечению и переход к трубчатому распределению.

Объяснением движения M -слоя в анодную плазму с нарастающей плотностью может служить то, что интенсивный пучок электронов, влетающей в анодную плазму и коллективно взаимодействуя с ней, приводит к ее разрежению [16] вблизи границы инжекции. В эту разреженную зону и перемещается ДС. Последовательное образование зоны разрежения и последующее смещение в нее ДС и создает механизм непрерывного перемещения ДС в плазме с нарастающей плотностью. Это объяснение требует дополнительного исследования.

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. В сильноточном плазменном диоде при низком давлении газа в зависимости от условий эксперимента возможно образование динамических ДС двух типов: K -слоя и M -слоя, разнесенных во времени и пространстве.

2. Возникновение и поддержание K -слоя, образующегося всегда на начальной стадии протекания тока, обеспечивается взаимообусловленными процессами генерации как катодных пятен, так и плазмы диодного промежутка. Поэтому K -слой оказывается как бы «привязанным» к катоду расширяющимся и растягивающимся со скоростью $v_{сл} \sim 10^8$ см/с шнуром.

3. M -слой образуется из-за неспособности плазмы перенести ток разряда вследствие дефицита заряженных частиц в межэлектродном пространстве по причине низкой скорости ионизации газа в условиях низкого давления.

4. В случае, когда плазма не заполняет все сечение диода, динамические

ДС поименованного тока I_k характеризуются дополнительными токовыми параметрами I_{1-4} .

5. Подбором начальных условий эксперимента можно задавать тип ДС, место локализации M -слоя, а также управлять параметрами ДС: током, падением потенциала и длительностью существования.

Литература

- [1] *Bloch L. P.* *Astroph. and Space Science*, 1978, v. 55, p. 59—83.
- [2] *Менделеев Б. Г., Святоозерская Л. А.* ЖТФ, 1951, т. 21, № 1, с. 18—25.
- [3] *Varey R. H., Sander K. F.* *Appl. Phys. (J. Phys. D)*, 1969, Ser. 2, v. 2, p. 541—550.
- [4] *Суладзе К. В., Цхакая Б. А., Плюто А. А.* Письма в ЖЭТФ, 1969, т. 10, № 2, с. 282—284.
- [5] *Луценко Е. И., Файнберг Я. Б., Педенко Н. С., Васильчук В. А.* ЖЭТФ, 1969, т. 57, № 11, с. 1575—1585.
- [6] *Карчевский А. И., Безмельницын В. Н., Макеев Г. Н., Муромкин Ю. А.* ЖЭТФ, 1969, т. 57, № 3, с. 819—827.
- [7] *Абдулин Э. Н., Баженов Г. П., Ерохин Г. П., Ладыженский О. Б.* Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 5, с. 257—261.
- [8] *Мхеидзе Г. П., Плюто А. А., Корон Е. Д.* ЖЭТФ, 1971, т. 41, № 5, с. 952—962.
- [9] *Абдулин Э. Н., Баженов Г. П., Бастриков А. Н.* и др. *Физика плазмы*, 1985, т. 11, № 1, с. 109—110.
- [10] *Луценко Е. И., Середа Н. Д., Целуйко А. Ф.* В кн.: III Всес. конф. по физике газового разряда. Киев, 1986, с. 246—248.
- [11] *Иваненков Г. В.* *Физика плазмы*, 1986, т. 12, № 6, с. 733—741.
- [12] *Луценко Е. И., Середа Н. Д., Концевой Л. М.* ЖТФ, 1975, т. 45, № 4, с. 789—795.
- [13] *Луценко Е. И., Середа Н. Д., Целуйко А. Ф., Бизюков А. А.* Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 22, с. 1349—1353.
- [14] *Луценко Е. И., Середа Н. Д., Димитрова В. Д.* *Физика плазмы*, 1984, т. 10, № 1, с. 151—164.
- [15] *Незлин М. В.* *Физика плазмы*, 1981, т. 7, № 5, с. 1048—1054.
- [16] *Nagendra Singh.* *Plasma Physics*, 1982, v. 24, N 6, p. 639—660.

Харьковский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило в Редакцию
27 марта 1987 г.