

ФОРМИРОВАНИЕ ИОННОГО ПУЧКА В ПОЛЕ ДВОЙНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ

И.А.Бизюков,
К.Н.Середа

Харьковский государственный универси-
тет. Украина, 310108, Харьков,
пр. Курчатова, 31

The ion beam generation and processes in the impulse straight high-current gas discharge with spatial stabilized potential jump under low pressure are experimentally investigated. Potential jump stabilization is provided by spatial inversion of magnetic field that divides the plasma on the cathode and anode parts. The potential drop of 3-10 kV is fed to the discharge gap where preliminary plasma with density of $(5 - 300) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ exists. It was shown that initially the near electrode layer of potential

drop was formed and further in the place of magnetic field inversion the formation of quasi-stady state double layer was occurred. All potential drop fed to the discharge gap was concentrated in the double layer, where generation of ion and electron beams occurs. The ion beam current is determined by Bohm's current of anode part plasma ($j \leq 0.6 \text{ А / см}^2$) and the ion beam energy is determined by the potential drop on the double layer (3-10 kV).

Особый интерес в рамках работ по созданию и исследованию газоразрядных источников заряженных частиц представляют устройства, в которых реализуется режим с оторванным от электродов ускоряющим электрическим полем [1].

В этой работе приводятся результаты экспериментов по исследованию пространственной стабилизации в объёме плазмы ускоряющего электрического поля и генерации в нём пучков заряженных частиц. Исследована динамика протекания импульсного сильноточного прямого разряда низкого давления в продольном реверсивном магнитном поле.

Эксперименты проводились на установке, схема которой представлена на Рис. 1. Устройство для формирования пучка ионов представляет собой разрядный промежуток, разделённый реверсом магнитного поля на катодную и анодную области. Реверс создавался с помощью двух включенных встречно секций катушек продольного магнитного поля (напряжённость магнитного поля на оси системы составляла 0,7-1 кэ). Предварительная плазма с концентрацией $n_0 \approx 5 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ создавалась пучково-плазменным взаимодействием при инжекции в разрядный промежуток со стороны анода электронного пучка с параметрами: ток 4 А, энергия 10 кэВ, длительность импульса 160 - 200 мксек (начальный диаметр плазменного столба 2 см, степень ионизации ~100%). Высокое напряжение на электроды прямого разряда величиной 3-10 кВ подавалось с задержкой 10-100 мксек относительно окончания инжекции электронного пучка. Высоковольтным электродом был анод, катод заземлялся. Обратными токопроводами служили медные шины, уложенные вдоль вакуумной камеры (стеклянная труба с внутренним диаметром 12 см) и экранирующие оплётки высоковольтных высокочастотных кабелей, с помощью которых к аноду подводилось высокое напряжение. В результате индуктивность системы оказалась $L_0 \approx 2 \text{ мкГн}$, а реактивное сопротивление $X_L \approx 0.8$. Для экстракции из разрядного промежутка ионного пучка в катод имелись 60 отверстий диаметром 0.5 см каждое (прозрачность катода 45%), а на расстоянии 3 см от катода был расположен коллектор ионов.

В процессе экспериментов измерялись следующие параметры: напряжение на электродах (V_d) — с делителя R_1, R_2 ; токи разряда (I_d) и ионного пучка (I_i) — широкополосными поясами Роговского; концентрация плазмы во времени в катодной области разрядного промежутка — по запиранию микроволнового сигнала с частотой 9.2 ГГц; высокочастотное излучение из плазмы анодной области (R_a) во времени — регистрировалось широкополосной рупорной антенной; распределение потенциала по длине плазменного шнура во времени — с помощью одновременного осциллографирования сигналов с внешних ёмкостных зондов, расположенных по длине разрядного промежутка.

На Рис.2 представлены осциллограммы измерявшихся параметров (стационарный реверс магнитного поля, расстояние катод — реверс 110 см). На Рис.3 показана качественная картина эволюции пространственного распределения потенциала плазмы, восстановленная из характера сигналов с внешних ёмкостных зондов. Длительное существование высокого напряжения на электродах и форма осциллограмм напряжения и тока разряда свидетельствуют о том, что разрядный промежуток представляет большое сопротивление электрическому току. Характер сигналов с ёмкостных зондов говорит о том, что ток возникает в условиях, когда напряжение, приложенное к электродам, распределяется в области разрядного промежутка между катодом и реверсом вследствие малой концентрации предварительной плазмы в этой области. Однако, наблюдаемый через 1-2 мксек после начала разряда срыв сигнала с зонда в области реверса, рост, в течение этого времени, сигналов с зондов в катодной области и неизменный характер сигнала с зонда в анодной области разрядного промежутка свидетельствуют о том, что падение потенциала перераспределяется частично на прикатодный слой, а частично в область реверса магнитного поля. Через время 3-4 мксек после начала разряда наблюдается отсечка СВЧ-волны в катодной части разрядного промежутка, что свидетельствует об образовании плотной плазмы, по-видимому, в результате развития катодных пятен. Вследствие этого снимается ограничение числа носителей тока вблизи катода, прикатодный слой ионного объёмного заряда исчезает и всё падение потенциала на разрядном промежутке перераспределяется в область между реверсом магнитного поля и плотной плазмой катодных пятен. Наблюдаемое дальше плавное уменьшение практически до нулевого уровня сигналов с зондов в катодной области и неизменный при этом характер сигнала с зонда в анодной области (по форме и длительности соответствует осциллограмме напряжения разряда) свидетельствуют о том, что к моменту заполнения катодной области плотной плазмой ($n > 10^{13} \text{ см}^{-3}$) всё приложенное к разрядному промежутку напряжение сосредотачивается в области реверса магнитного поля, где образуется двойной электрический слой [2]. Из полного совпадения по форме и длительности сигналов с зондов в катодной области разрядного промежутка следует, что заполнение катодной области плотной плазмой происходит не вследствие растекания плазмы катодных пятен, а, в основном, вследствие ионизации при пучково-плазменном взаимодействии. Сигнал с зонда, расположенного в области реверса магнитного поля, носит более сложный характер и имеет ненулевой уровень в течение всего времени горения разряда, что свидетельствует о том, что двойной электрический слой имеет конечные размеры (до 10 см).

С момента начала и в течение всего времени существования высокого напряжения на электродах, в местах локализации электрического поля происходит ускорение заряженных частиц (электронов в сторону анода, ионов в сторону катода), о чём свидетельствуют ток, регистрируемый с коллектора ионов, и высокочастотное излучение из анодной области разрядного промежутка, возникающее вследствие взаимодействия генерируемого электронного пучка с собственными флуктуациями плазмы. Через 3 - 4 мксек после начала разряда, т.е. в момент исчезновения прикатодного слоя падения потенциала, в токе ионного пучка наблюдается пауза длительностью 3 - 4 мксек, окончание которой совпадает с моментом образования в области реверса магнитного поля двойного электрического слоя. Наличие паузы в токе ионного пучка обусловлено низкой концентрацией плазмы на участке разрядного про-

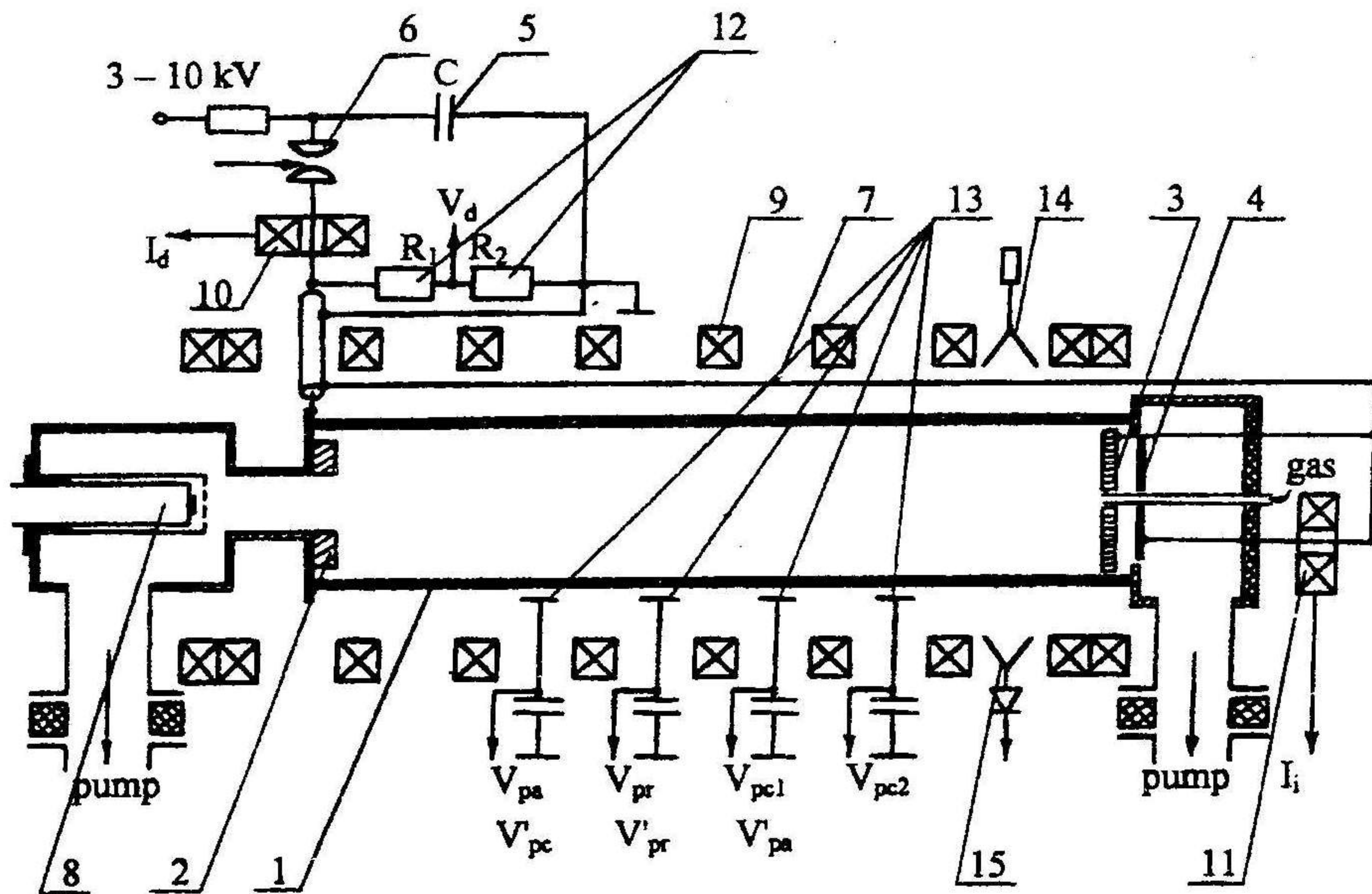


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1—стеклянная вакуумная камера; 2—высоковольтный электрод (анод); 3—заземлённый электрод (катод); 4—коллектор ионного пучка; 5—ёмкостной накопитель энергии; 6—вакуумный разрядник; 7—обратные токопроводы; 8—электронная пушка; 9—катушки удерживающего магнитного поля; 10, 11—пояса Роговского для измерения тока разряда и тока ионного пучка, соответственно; 12—делиитель напряжения для измерения напряжения разряда; 13—внешние ёмкостные зонды; 14—излучающая рупорная антенна с отражательным клистроном; 15—приёмная рупорная антенна с детекторной головкой.

межутка между плазмой катодных пятен и реверсом магнитного поля. Длительность паузы в токе ионного пучка растёт с увеличением расстояния между катодом и реверсом магнитного поля.

Режим разряда с двойным слоем стабилизированным в плазменном объёме является оптимальным для генерации ионного пучка. В этом случае ионы анодной плазмы, концентрация которой эффективно поддерживается пучково-плазменным взаимодействием, ускоряются электрическим полем двойного слоя и формируются в пучок. Энергия ионного пучка определяется напряжением на двойном слое (3–10 кВ), а ток соответствует Бомовскому току анодной плазмы ($j \leq 0,6 \text{ А/см}^2$). Высокая концентрация катодной плазмы обеспечивает зарядовую и токовую компенсацию ионного пучка. Прекращение генерации пучков заряженных частиц регистрируется по исчезновению высокочастотного излучения из анодной плазмы, что совпадает по времени с моментом перехода разряда в низковольтный индуктивный режим. Переход разряда в этот режим обусловлен, по-видимо-

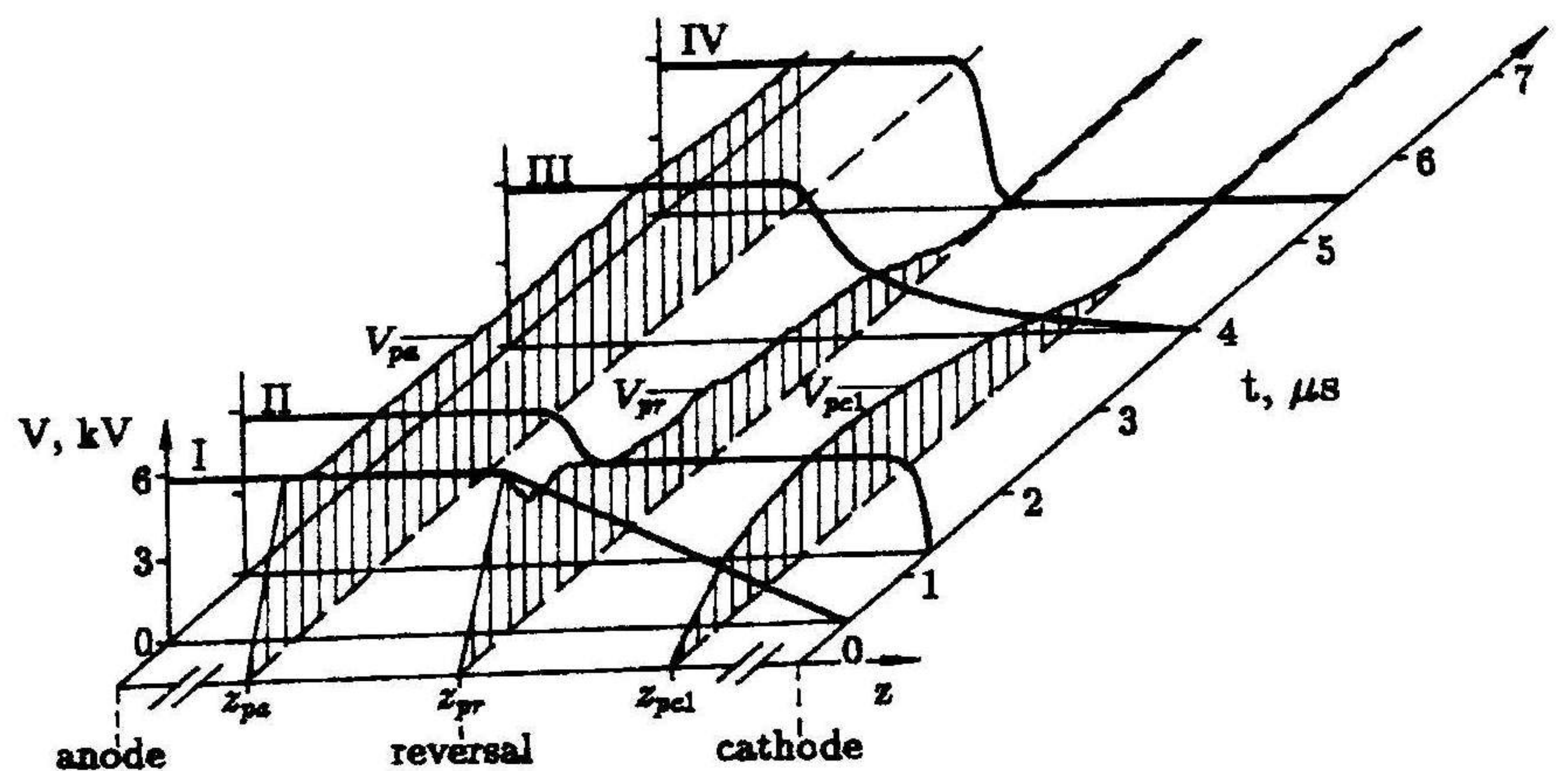


Рис.3. Качественная картина эволюции пространственного распределения потенциала плазмы, восстановленная из анализа характера сигналов с внешних ёмкостных зондов.

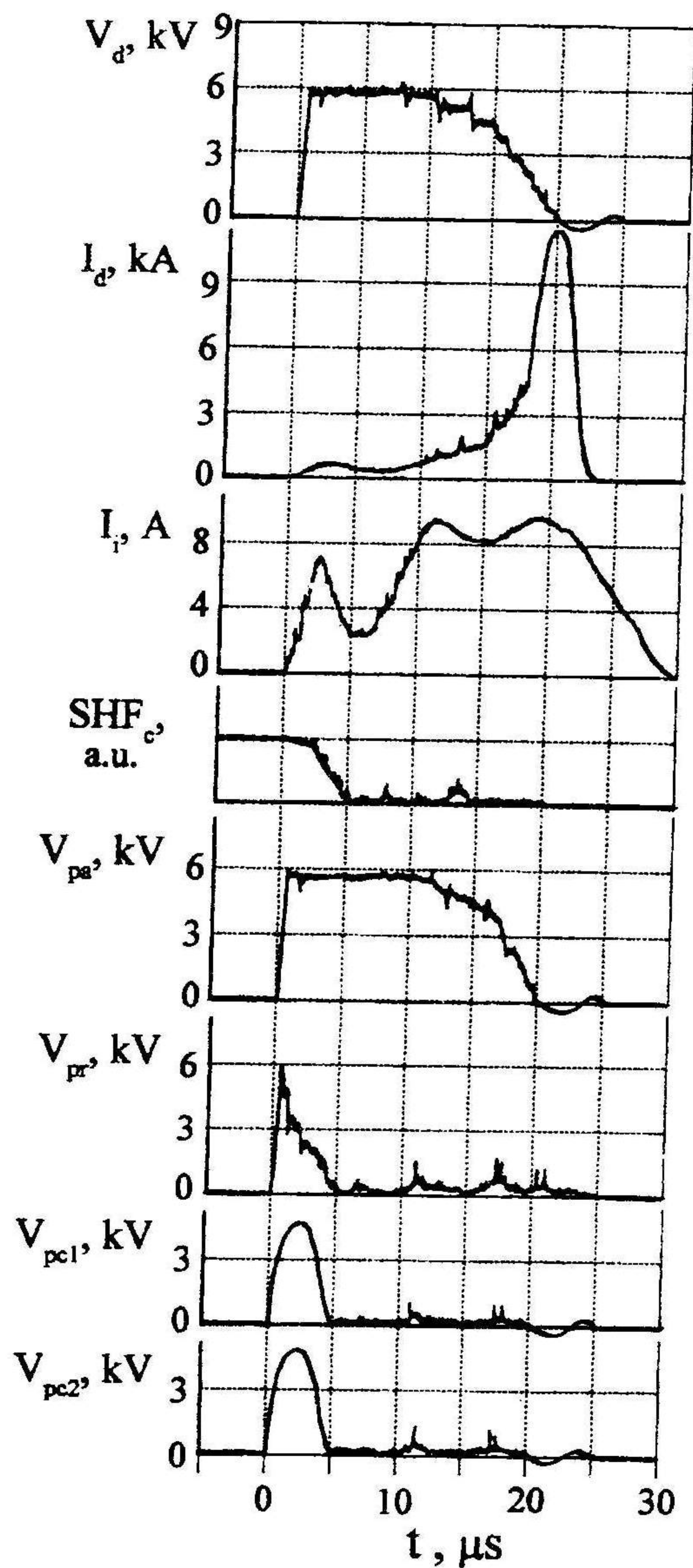


Рис.2. Осциллограммы напряжения (V_d) и тока (I_d) разряда, тока ионного пучка (I_i), СВЧ-сигнала в катодной области (SHF_c), сигналов с внешних ёмкостных зондов ($V_{pa}, V_{pr}, V_{pc1}, V_{pc2}$), расположенных в анодной области, области реверса и катодной области, соответственно. Давление $p = 8 \cdot 10^{-5}$ Торр.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е.И.Луценко, Н.Д.Середа, Л.М.Концевой. "Исследование динамики формирования электронных пучков в прямом разряде", ЖЭТФ, 67, 3(9), стр. 979, (1974).
- [2] В.Л.Липеровский, М.И.Пудовкин. "Аномальное сопротивление и двойные слои в магнитосферной плазме", Издательство "Наука", Москва 1983, стр. 69.
- [3] А.И.Морозов. "Физические основы космических электро-реактивных двигателей". Том 1. "Элементы динамики потоков ЭРД". Москва "Атомиздат" 1978, стр. 208.

му, повышением концентрации анодной плазмы до уровня концентрации катодной плазмы вследствие ионизации при пучково-плазменном взаимодействии.

Из полученных в работе результатов следует, что прямой разряд низкого давления в режиме высоковольтного омического разряда с оторванным от электродов электрическим полем является простой и эффективной системой для генерации пучков заряженных частиц. Результаты экспериментов подтверждают, что местом и временем возникновения в плазменном объёме двойного электрического слоя можно управлять, искусственно создавая область повышенного сопротивления протеканию тока с помощью поперечного или реверсивного поля.

Механизм токопереноса через реверс магнитного поля требует дальнейших детальных исследований. Поскольку пристеночная электронная проводимость, обусловленная скрещенной конфигурацией электрического и магнитного полей [3] не может обеспечить величину разрядного тока, как в наших экспериментах. По-видимому, имеется механизм подавления магнитного барьера обеспечивающий уменьшение сопротивления протеканию электрического тока и приводящий к разрушению двойного электрического слоя.