

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР

Ученый Совет по физике  
отделения физико-математических наук

---

На правах рукописи

В.А.БОНДАРЬ

ПОЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ С ТЕМПЕРАТУРОЙ  
ДО 100000 °K

( 044 - оптика )

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск, 1968

Работа выполнена в лаборатории высокотемпературной оптики Ордена Трудового Красного Знамени Института физики АН БССР.

Научные руководители:

академик АН БССР, доктор физико-математических наук, профессор М.А.Ельяшевич,  
кандидат физико-математических наук Л.И.Киселевский.

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук М.П.Ванюков
2. Кандидат технических наук А.А.Янковский.

Ведущее предприятие – Горьковский государственный университет им. Н.И.Лобачевского.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 1968г.

Защита состоится \_\_\_\_\_ 1969г.

на заседании Ученого Совета по физике отделения физико-математических наук АН БССР.

Отзывы и замечания на автореферат направлять по адресу: г. Минск, Ленинский пр. 70, Институт физики

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-  
математических наук  
/ Н.С.Петров /

В связи с развитием ряда новых направлений в науке и технике заметно возрос в последнее время интерес к разработке лабораторных методов получения и исследования низко-температурной плазмы.

Значительный прогресс в этом направлении к настоящему времени достигнут для умеренных значений температур ( до  $10000 - 15000^{\circ}\text{K}$  ). Для этого интервала температур имеются разнообразные источники плазмы, основанные на электрических, газодинамических и взрывных явлениях ( стабилизированные разряды, плазмотроны, диафрагменные ударные трубы и т. д. ). С помощью этих источников удается получать плазменные образования контролируемого состава, пригодные для изучения их физических, оптических, электрических и других свойств.

Значительно беднее арсенал лабораторных источников, позволяющих нагревать плазму до температур в десятки тысяч градусов. Этот диапазон температур представляет в настоящее время большой интерес для решения ряда задач астрофизики, изучения оптических явлений, сопутствующих мощному взрыву в атмосфере, развитию лазерной искры и т.д. Отсутствие надежных лабораторных источников плазмы с температурой в десятки тысяч градусов является основной причиной того, что до последнего времени современные экспериментальные методы исследования не достаточно применялись для изучения плазмы в условиях повышенной зарядности ионов. Практически отсутствуют работы по экспериментальному опре-

делению сил осцилляторов линий ионов высокой кратности, по сечениям столкновений, в которых принимают участие эти ионы и т. д.

Все это вызывает необходимость создания новых высоко-температурных источников плазмы и разработки средств и способов повышения температуры известных лабораторных источников.

В настоящей работе сделана попытка применения импульсного разряда с капиллярным ограничением канала для получения высокотемпературной плазмы с контролируемыми параметрами. В ней ставились следующие основные задачи:

1. На основе исследования различных вариантов капиллярных разрядов разработать способы получения высокостабильной осесимметричной равновесной плазмы контролируемого состава с осевой температурой до  $100000^{\circ}\text{K}$ .

2. Оптическими и спектроскопическими методами изучить физические свойства и разработать методы диагностики получаемых плазменных образований.

3. Рассмотреть возможности применения импульсных капиллярных разрядов для количественных спектроскопических и теплофизических исследований плазмы в температурном интервале до  $100000^{\circ}\text{K}$ .

Диссертационная работа состоит из четырех глав. В первой главе излагаются основные лабораторные методы получения плазмы и указываются направления, по которым может идти разработка плазменных источников для температурного диапазона в десятки тысяч градусов. В обзоре основное внимание

уделено импульсным разрядам. Наряду с повышением температуры плазмы импульсного разряда дополнительно выдвигались условия высокой стабильности получаемой плазмы и возможность контроля и управления ее составом. Импульсные разряды в обычной форме не удовлетворяют указанным требованиям. Плохая пространственная и временная стабильность плазмы импульсного разряда, обусловленная хаотическим блужданием оснований разряда по поверхности электродов и выбросом сверхзвуковых факелов в межэлектродный промежуток, ограничивает возможности применения его при спектроскопических и других количественных измерениях.

При переходе к более мощным разрядам с целью повышения температуры плазмы возникают дополнительные затруднения, связанные с появлением сверхзвуковых факелов, взаимодействие которых в межэлектродном промежутке приводит к образованию ударно сжатых областей плазмы, обладающих высокими коэффициентами поглощения.

Чтобы стабилизировать плазму импульсного разряда, необходимо прежде всего устранить влияющее действие электродных факелов. Одним из способов устранения этого влияния может быть создание газовых или плазменных потоков, направленных в сторону электродов из центральной области межэлектродного промежутка с целью блокировки электродных факелов. Подобные потоки могут образовываться при установке капилляров с испаряющимися стенками внутри межэлектродного промежутка.

При импульсном разряде через капилляр из его отверстий выбрасываются с большой скоростью (до десятков км/сек) плазменные струи, состоящие в основном из продуктов разру-

нения стенок капилляра. При относительно мощных разрядах эти струи являются сверхзвуковыми. При набегании сверхзвуковой струи на преграду на некотором расстоянии от нее образуется ударно сжатая область. В нашем случае преградой служил один из электродов разряда. Ударная волна, образуемая вокруг электрода, может полностью блокировать электродные факелы вблизи поверхности электродов. Используя этот эффект представляется возможным выделить некоторый участок канала разряда, где будет полностью исключено влияние электродных процессов как на структуру разряда, так и состав плазмы.

Проведенный анализ физических процессов, сопутствующих импульсным разрядам с капиллярным ограничением канала, показал перспективность поисков средств дальнейшего повышения температуры, базирующихся на применении таких разрядов. На основе этого анализа были сформулированы задачи настоящей работы.

Во второй главе приводятся результаты исследований импульсного разряда, локализованного двумя короткими капиллярами, установленными у каждого из электродов. Исследования проводились с разрядами от импульсного генератора, конструкция которого давала возможность варьировать параметры разряда в широких пределах. Напряжение зарядки конденсаторов изменялось от 1 кв до 5 кв, емкость конденсаторов — от 50 мкф до 300 мкф. Индуктивность разрядного контура составляла 1,5 мкн.

Основные исследования проведены с разрядами между медными электродами и капиллярами из плексигласа, установленными

в специальной разрядной камере. Конструкция камеры позволяла проводить наблюдения в различных плоскостях и при разных расстояниях между электродами и капиллярами. Спектры фотографировались на спектрографах ИСП-28 и ИСП-30. Фотометрические измерения проводились на микрофотометрах МФ-2 и МФ-4. Спектроскопические исследования связывались со структурой разряда. Структура плазменных образований изучалась с помощью сверхскоростной камеры СФР-2 в вариантах покадровой съемки и непрерывной развертки. Скорость развертки изменялась в пределах от 550 м/сек до 1100 м/сек. Частота съемки составляла 125000 кадр/сек.

Импульсный разряд через два последовательных капилляра сопровождается сложными движениями и взаимодействиями плазменных струй. Отчетливо регистрируются две плазменные струи, выбрасываемые в стороны электродов. Эти струи создают вблизи электродов области повышенной плотности, через которые электродные факелы не проникают в направлении капилляров, а, следовательно, и в пространство между ними (центральный участок межэлектродного промежутка). Во время разряда в пространство между пластинами также выбрасываются две встречные плазменные струи, после столкновения которых происходит растекание плазмы по радиальным направлениям. Через 15 - 20 мксек от начала разряда в пространстве между капиллярами образуется плазма в форме диска, радиус которого в зависимости от режима разряда составляет 3 - 10 см.

Гидродинамические явления взрывного характера в случае разряда через капилляры проявляются более отчетливо чем при разряде той же мощности между открытыми электродами.

Если два последовательных капилляра изготавливаются внутри пластинок, устанавливаемых параллельно на некотором расстоянии друг от друга, то форма ударной волны остается все время цилиндрической. Затухание интенсивности волны со временем происходит в этом случае более медленно по сравнению со сферической волной. Ударные волны в воздухе, вызванные разрядом, регистрируются скоростными приборами в излучении на сравнительно больших расстояниях ( до 50 - 60 мм ) от оси разряда. При установке в пространстве между пластинами на некотором расстоянии от оси разряда твердой преграды на временных развертках можно наблюдать отраженную от этой преграды ударную волну, возвращающуюся обратно в плазму. Отраженная ударная волна встречается с набегающим потоком и взаимодействует с ним. При взаимодействии двух потоков плазмы происходит изменение плотности и яркости свечения и в месте встречи этих двух потоков образуется так называемая  $\lambda$  - конфигурация.

Регистрируемая отраженная ударная волна в плазме является волной малой амплитуды и скорость ее распространения близка к скорости звука в плазме. Знание скорости звука в плазме дает возможность определить температуру среды. Изменяя положение преграды, отражающей ударные волны, представляется возможным определять температуру плазмы на различном расстоянии от оси разряда и в различные стадии разряда.

Спектроскопические исследования, проведенные в работе, показали, что спектр локализованного капиллярами разряда существенным образом отличается от спектра обычного разряда



той же мощности. В спектре локализованного разряда независимо от природы окружающей атмосферы регистрируются только линии элементов, входящих в состав капилляра ( в случае капилляра из плексигласа линии водорода, углерода и кислорода ). Практически отсутствуют линии азота, что свидетельствует об эрозионном характере плазмы, образующейся из сублимирующих стенок капилляра. Наиболее богато представлен спектр кислорода, у которого регистрируется большой набор линий ионов разной кратности ( от  $OII$  до  $OVI$  ). В спектре отсутствуют линии меди. Это согласуется с утверждением о том, что пары электродов не проникают в область между пластинами.

Характерной особенностью является также и то, что в спектре локализованного разряда регистрируются одновременно как линии нейтральных атомов, так и линии многозарядных ионов различной кратности, причем спектры различных компонент пространственно разделены.

Из анализа спектров было установлено, что плазменный диск является неоднородным осесимметричным плазменным образованием. Температура принимает максимальное значение в приосевой области. Ее значение уменьшается с удалением от оси разряда.

В общем случае диагностика неоднородной плазмы представляет собой очень сложную задачу, так как одновременно регистрируется излучение из зон, находящихся в различных физических условиях. Однако для неоднородностей, обладающих определенной симметрией, существует принципиальная возможность перехода от регистрируемой суммарной картины к истин-

ному пространственному распределению. Наиболее легко это осуществляется в случае осесимметричных неоднородностей, к которым с большим приближением может быть отнесен получаемый плазменный диск.

Проведенные оценки коэффициента поглощения для различных спектральных линий показали, что плазменный диск можно считать оптически тонким и для получения истинной радиальной зависимости интенсивности линий в нем можно воспользоваться методами пересчета, справедливыми для оптически прозрачных источников. В работе был применен метод численного решения интегрального уравнения Абеля.

Детальный анализ спектров показал, что исследуемая плазма имеет сильный температурный градиент. Температура вблизи оси разряда составляет  $10^5$  °К, а на расстоянии от нее в 20 - 30 мм понижается до  $10^4$  °К. В результате при удалении от оси разряда температура последовательно проходит через значения, соответствующие максимумам концентраций ионов разной кратности. Это и вызывает появление пространственно разделенных пиков интенсивности у соответствующих линий.

При измерении температуры в осесимметричной плазме, в которой выполняются условия локального термодинамического равновесия, удобным является метод Фаулера и Милна, разработанный в астрофизике и основанный на сопоставлении измеряемых истинных профилей интенсивностей с теоретически рассчитанными функциями возбуждения  $\mathcal{E}(T, P)$ . Рассчитанные термодинамический состав плазмы в температурном диапазоне от 20000 °К до 120000 °К и теоретические кривые  $\mathcal{E}(T, P)$

для линий ионов кислорода  $OII \lambda = 3390 \text{ \AA}^0$ ,  $OIII \lambda = 3047 \text{ \AA}^0$ ,  $OIV \lambda = 3063 \text{ \AA}^0$ ,  $O V \lambda = 3144 \text{ \AA}^0$ ,  $OVI \lambda = 3811 \text{ \AA}^0$ , позволили произвести такие измерения температуры плазмы. Области, соответствующие возбуждению отдельных ступеней ионизации, близко следуют одна за другой, так что измерение температурного профиля можно осуществлять без существенного перерыва по линиям ближайшей ступени ионизации. Точки, полученные по разным спектральным линиям, достаточно хорошо располагаются вдоль одной кривой, что может свидетельствовать в пользу правомерности применяемого способа определения температурного профиля.

В периферических областях температура плазмы была измерена по распределению интенсивности в колебательной структуре молекулы  $CN$ . Результаты измерения температуры в этой области совпадают с данными, полученными по определению скорости звука в плазме.

Температурное поле плазменного диска, заключенного между пластинами, можно разделить на две зоны: центральную с максимальной температурой на оси выше  $100000 \text{ }^0\text{K}$  и внешнюю, в которой температура плазмы постепенно спадает до  $10000 \text{ }^0\text{K} - 5000 \text{ }^0\text{K}$  ( на расстоянии  $\sim 20 \text{ мм}$  от оси разряда ). Центральная зона имеет очень крутой градиент температуры (  $10^6 \text{ град/см}$  ), за исключением области, непосредственно примыкающей к оси. Примерно на расстоянии в  $20 \text{ мм}$  от оси разряда градиент температуры падает до  $10^5 \text{ град/см}$ .

Так как в нашем случае одновременно возбуждаются линии ионов различной кратности, то для построения температурного

профиля достаточно знать только значения температур, соответствующих максимумам функций возбуждения, и расстояния максимумов интенсивности линий ионов от оси разряда.

Необходимым условием применения такого метода является наличие в плазме элемента, находящегося в ионизированных состояниях разной кратности. От числа этих состояний зависит число точек, по которым строится профиль температуры. В случае разряда через плексигласовые капилляры кислород находится в пяти различных ионизированных состояниях (OII - OVI). Поэтому он является удобным элементом для построения температурного профиля по положению максимумов интенсивности линий ионов.

Определение температурного поля плазмы было проведено также на основе решения уравнения энергетического баланса, которое известно для цилиндрического слоя плазмы при отсутствии конвективных потерь и потерь на излучение под названием уравнения Эленбааса-Хеллера и имеет вид:

$$\sigma(T) \cdot E^2 + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[ r \cdot \kappa(T) \cdot \frac{dT}{dr} \right] = 0 \quad (1)$$

Полученный таким способом температурный профиль практически совпадает с усредненной кривой, полученной по разным спектральным линиям. Наблюдается хорошее соответствие температурных профилей плазмы в интервале температур от 110000 °K до 300000 °K, т. е. в том интервале, где справедливы допущения, принятые при решении уравнения баланса энергии.

При проведении различных спектроскопических измерений возникает необходимость в знании распределения плотности

электронов, а также других заряженных частиц. Измерение радиального профиля электронов в плазменном диске было проведено путем определения абсолютной интенсивности непрерывного излучения плазмы и сравнения полученных данных с теорией непрерывных спектров плазмы, развитой Л.М.Биберманом с сотрудниками. Согласно этой теории для плазмы, состоящей из разных химических элементов, при наличии ионов разной кратности, справедливо следующее выражение для плотности непрерывного излучения:

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{C \cdot N_e}{\sqrt{kT}} \cdot \sum_{l, z} \exp\left[\frac{h\Delta\nu_l - e\Delta I_z}{kT}\right] \cdot Z_l^2 \cdot N_{l,z} \cdot \xi_{l,z}(\nu) \quad (2)$$

Из (2) для  $N_e$  имеем

$$N_e^2 = \frac{\varepsilon(\nu, T) \cdot kT^{1/2}}{C \cdot \sum_{l, z} \exp\left[\frac{h\Delta\nu_l - e\Delta I_z}{kT}\right] \cdot Z_l^2 \cdot N_{l,z} \cdot \xi_{l,z}(\nu)} \quad (3)$$

В таблице I приведены измеренные значения  $N_e$  и  $T$  на различных расстояниях  $r$  от оси разряда ( $U = 2$  кВ,

$C = 150$  мкф, диаметр капилляра — 2,5 мм, длина — 1 мм).

Проведенные измерения показали, что наблюдается резкий подъем  $N_e$  на расстоянии 5 — 6 мм от оси разряда в области температур 15000 — 20000 °К. Внутри самого канала разряда не происходит существенного изменения концентрации электронов. Максимальное значение  $N_e$  составляет  $\sim 9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Таблица I

Значения  $N_e$  и  $T$  на различных расстояниях от оси разряда.

| $r$ ( мм ) | $N_e \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-3}$ | $T$ °К |
|------------|--------------------------------------|--------|
| 0,5        | 8,6                                  | 90000  |
| 1,0        | 8,7                                  | 70000  |
| 1,5        | 9,0                                  | 50000  |
| 2,0        | 8,6                                  | 40000  |
| 3,0        | 7,5                                  | 30000  |
| 4,0        | 6,0                                  | 25000  |
| 5,0        | 3,0                                  | 20000  |

Располагая профилем концентрации электронов и распределением температуры и зная исходный состав, представляется возможным на основании уравнения Саха и квазинейтральности плазмы определить распределение всех остальных компонент плазмы. Такие определения были проведены в работе.

Распределение температуры и концентрации отдельных компонентов в плазме позволяет определить профиль давлений. Исследованиями установлено, что величина давления в канале разряда лишь незначительно превышает атмосферное, а в отдельных зонах оказывается даже несколько меньше этого значения. Наблюдается некоторое повышение давления ( выше атмосферного ) на расстоянии 6 – 7 мм от оси разряда. Затем в направлении к оси происходит спад давления

до 0,5 атм. На самой оси разряда давление снова увеличивается и достигает 1,7 атм. Такое характерное распределение давления можно объяснить на основе законов гидродинамики сверхзвукового истечения из сопла, а также наличием магнитного сжатия вследствие прохождения больших токов через плазму.

В третьей главе рассмотрены особенности импульсного разряда, локализованного одним коротким капилляром, устанавливаемым в средней части межэлектродного промежутка. Основное внимание уделено изучению открытого участка канала разряда, заключенного между срезом капилляра и одним из электродов. Этот участок канала разряда является высокостабильным осесимметричным плазменным образованием, свободным от электродных загрязнений. Проведено сопоставление условий в открытом участке канала с условиями в плазменном диске.

При сверхзвуковом истечении непрерывного потока из сопла движение в основном происходит только внутри квазицилиндрического объема, ограниченного висячими скачками уплотнения. Такое же явление наблюдается и при истечении плазмы. Поэтому плазма, заключенная между срезом капилляра и фронтом ударной волны перед электродом, не испытывает заметных радиальных расширений, как это имеет место в случае плазменного диска между пластинами.

Открытый участок канала после кратковременной стадии формирования остается весьма стабильным во время разряда, о чем свидетельствуют резкие контуры канала и отсутствие на временной развертке признаков радиального расширения

плазмы. Радиальное ограничение канала висячими скачками уплотнения позволяет реализовать высокие значения температуры плазмы в открытых участках канала и возбуждать в них линии ионов высокой кратности. Характерной особенностью такой локализации является то, что плазма не контактирует с твердыми стенками, которые могут существенно искажать условия в ней.

Как показали исследования, обтекание плазменными струями анода и катода при разряде через один короткий капилляр существенно различается. Фронт свечения струи, набегающей на анод, образует поверхность близкую к конической. Угол раствора конуса несколько увеличивается при удалении от его вершины, т. е. светящаяся область как бы отталкивается от электрода. При обтекании плазменной струей катода основное свечение сосредоточено вблизи боковой поверхности электрода. Плазменный поток как бы скользит по поверхности катода. Различие в характере обтекания плазменными струями положительного и отрицательного электродов, по-видимому, связано с радиальной поляризацией плазмы и влиянием электрического и магнитного полей на движущуюся сильноионизованную плазму.

Спектроскопическими исследованиями установлено, что наиболее стабильным оказывается открытый участок канала разряда со стороны катода. В рассматриваемой области устраняется влияние процессов, протекающих на электродах, на воспроизводимость условий возбуждения, так как она изолируется от электродов ударной волной, через которую возмущения не могут передаваться набегавшим струям.



Спектр испускания открытого участка канала как и в случае плазменного диска состоит из линий ионов различной кратности, принадлежащих элементам, входящим в состав материала стенок капилляра. Измерение распределения температуры в канале указывает на существование в нем сильных радиальных температурных градиентов. Однако это не приводит к заметным отклонениям от равновесия в плазме. Значения температуры плазмы, полученные различными методами (методом Фаулера и Милна, методом абсолютных интенсивностей линий и путем решения уравнения энергетического баланса), находятся в хорошем согласии между собой.

Температура, определяемая по интенсивности спектральных линий, представляет собой температуру возбуждения, совпадающую с температурой электронной компоненты плазмы. Величина отклонения  $T_e$  от  $T_i$  незначительна. Знание распределения температуры и концентрации  $N_e$  позволяет сделать оценки времен установления равновесия. В приосевой области ( $T = 10^5$  °К) это время составляет  $\sim 10^{-7}$  сек., что значительно меньше характерных времен развития разряда и длительности пребывания частиц в плазме. Поэтому можно считать, что измеренные значения температуры характеризуют температуру как электронной, так и ионной компоненты плазмы.

Значение температуры плазмы на оси разряда, а также распределение ее в остальной части плазменного образования существенным образом зависят от режима разряда и геометрии капилляра. Проведенные исследования показали, что существуют некоторые оптимальные размеры капилляра для соответствующего режима разряда, при которых достигается максимальная

температура плазмы на оси разряда.

В четвертой главе описываются результаты исследований по применению капиллярных разрядов для количественных исследований плазмы различного состава. Показана возможность их применения для исследования теплофизических свойств плазмы с температурой в десятки тысяч градусов и для определения вероятностей оптических переходов ионов высокой кратности. Разряды могут быть использованы в качестве источников света для спектрального анализа трудновозбудимых элементов и для ряда других целей количественной спектроскопии.

На основе проведенных исследований капиллярных разрядов представляется возможным поднять верхний предел температуры плазмы чистых газов, доступный лабораторному эксперименту. Наиболее просто решить эту задачу для газов, которые можно использовать в разрядных конструкциях в твердом состоянии. В работе исследована возможность получения плазмы углекислого газа и водяных паров с температурой в максимуме до  $70000^{\circ}\text{K}$ . Изучено распределение температуры и концентрации электронов в такой плазме.

Состав спектра плазменного диска, а также спектра, возбуждаемого во внешнем участке канала разряда независимо от природы окружающей атмосферы в основном определяется материалом испаряющихся стенок капилляра. Поэтому, изготавливая капилляры из различных материалов, можно получать плазму, состоящую из любых элементов или их смесей.

Если свойства вещества таковы, что не представляется возможным изготавливать из него капилляры, то в этом

случае можно воспользоваться различными способами нанесения вещества на внутренние стенки капилляров. Покрывая стенки капилляра соответствующими веществами, можно получать плазму различного состава, в том числе и одноэлементную. Нанесение веществ на стенки капилляра можно осуществлять различными способами: пропитыванием растворами вещества стенок капилляра (если такими свойствами обладает материал, из которого изготовлен капилляр), нанесением тонкого слоя элемента вследствие взрыва проволоочки электрическим током и т. д. Последний способ может быть применен, в частности, для получения однокомпонентной металлической плазмы.

Получаемая плазма вследствие своей осесимметричности легко поддается спектроскопической диагностике, а также теоретической интерпретации. Все это делает ее перспективным источником при исследованиях оптических и теплофизических свойств плазмы с температурой в десятки тысяч градусов.

Проведенные в работе исследования открывают возможность экспериментального построения зависимости интенсивности от температуры для линий ионов высокой кратности.

Изученный тип разряда может оказаться перспективным и для решения ряда задач эмиссионного спектрального анализа. Известно, что основная трудность, возникающая при спектральном анализе галогенов, серы, фосфора и некоторых других элементов, состоит в необходимости применения высокотемпературных источников света с минимальным содержанием в зоне свечения атомов окружающей атмосферы и продуктов эрозии электродов. Как показали исследования этим

требованиям удовлетворяет открытый участок канала разряда через капилляр. Рассмотренный в работе источник света по чувствительности определения малых количеств трудновозбудимых элементов не уступает лучшим источникам спектрального анализа, требующим, однако, применения сложной техники, не всегда доступной в заводских условиях. В таблице 2 приведены значения чувствительности определения малых количеств хлора, брома, иода, серы и фосфора в водных растворах их солей, достигнутые на разряде с капилляром. Чувствительность оказывается примерно одного порядка с максимальной чувствительностью, полученной в полном катоде. В то же время условия работы с разрядом через капилляр намного проще, чем с разрядом в полном катоде.

Таблица 2

Чувствительность определения малых количеств трудновозбудимых элементов в водных растворах их солей.

| Элемент | Чувствительность ( в г )      |                     |
|---------|-------------------------------|---------------------|
|         | локализованный<br>имп. разряд | полный катод        |
| Cl      | $5 \cdot 10^{-6}$             | $10^{-6}$           |
| Br      | $2 \cdot 10^{-5}$             | $10^{-5}$           |
| I       | $10^{-5}$                     | $2,5 \cdot 10^{-6}$ |
| S       | $5 \cdot 10^{-7}$             | -                   |
| P       | $5 \cdot 10^{-7}$             | -                   |

Исследование распределения температуры и концентрации электронов в высокоионизованной плазме позволяет определить ее основные теплофизические параметры: энтальпию, энтропию, электропроводность, теплопроводность и другие. Измеренные в работе значения электропроводности и теплопроводности углеродно-кислородной плазмы находятся в удовлетворительном согласии с расчетными в области температур от  $50000^{\circ}\text{K}$  до  $100000^{\circ}\text{K}$ .

Разработанные методы получения плазмы позволяют определять плотности излучения в спектральных линиях ионов различной кратности и непрерывном спектре. Это необходимо для измерения коэффициентов испускания и поглощения высокоионизованной плазмы, а также сил осцилляторов для спектральных линий многозарядных ионов. Ввиду ограниченности применения различных теоретических методов расчета вероятностей оптических переходов и отсутствия в ряде случаев внутренних критериев точности экспериментальные работы в этом направлении приобретают особую актуальность.

Таким образом, на основе исследований, проведенных в работе, разработаны методы получения плазмы контролируемого состава с температурой выше  $10^5^{\circ}\text{K}$ . Получаемая плазма не контактирует в плоскости наблюдения с какими-либо твердыми телами. Она обладает высокой стабильностью и легко поддается различным методам диагностики ее физических параметров.

Изучена кинетика физических процессов, протекающих при разрядах, локализованных капиллярами. Разработана

методика определения температуры плазмы в различные фазы разряда по скорости отраженной ударной волны.

Разработаны методы определения распределения температуры, концентрации различных компонент и давления по радиусу плазменного образования и установлено, что в получаемой плазме выполняются условия локального термодинамического равновесия.

Показана возможность получения плазмы чистых газов и других веществ с температурой в десятки тысяч градусов, пригодной для проведения различных спектроскопических исследований, измерения сил осцилляторов, исследования теплофизических свойств высокоионизованной плазмы, спектрального анализа трудновозбудимых элементов, определения функций возбуждения и т. д.

Получаемые при капиллярном разряде осесимметричные плазменные образования могут оказаться перспективными при проведении различных исследований.

Основные материалы диссертации докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции по вопросам измерения высоких температур ( Харьков, 1965 ), на 4 - ом Сибирском совещании по спектроскопии ( Томск, 1965 ), на Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах ( Новосибирск, 1966 ), на I - ой Всесоюзной конференции по низкотемпературной плазме ( Киев, 1966 ), на 5 - ом Белорусском республиканском совещании по спектральному анализу ( Минск, 1967 ), на городском семинаре по спектральному анализу ( Горький, 1968 ), на 2 - ой Всесоюз-

ной конференции по физике низкотемпературной плазмы ( Минск, 1968 ) и опубликованы в следующих статьях:

1. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, Ж П С, 5, вып. 3, 1966.
2. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, Ж П С, 5, вып. 5, 1966.
3. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, Е.П.Трухан, Мат-лы Всесоюзной конференции по низкотемпературной плазме, Киев, 1966.
4. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, Т В Т, 5, вып. 6, 1967.
5. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, Мат-лы научно-теоретической конференции Минского пединститута им. А.М.Горького, сер. физ.-мат., Минск, 1966, стр. 21.
6. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, Мат-лы научно-теоретической конференции Минского пединститута им. А.М.Горького, сер. физ.-мат., Минск, 1966, стр. 25.
7. В.А.Бондарь, Л.И.Киселевский, в сб. "Применение спектрального анализа в народном хозяйстве и научных исследованиях", стр. 6, Минск, 1967.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

АТ 17978. Подписано к печати 3.XII.1968 г. Зак. 80.

Объем 1,5 п.л. Тираж 200 экз.

---

Отпечатано на ротационной машине Минского пединститута им. А.М.Горького  
г. Минск, ул. Советская, 12.