

ОСОБЕННОСТИ СЛАБОТОЧНОГО РАЗРЯДА С МАЛЫМ АНОДОМ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Гостев В.А., Мамкович В.В.

The research described in this publication was made possible in part by Award No. PZ-013-02 of the U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF) and of Ministry of Education of Russian Federation.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках проекта PZ-013-02, поддерживаемого совместно Американским фондом гражданских исследований и развития (АФГИР), Министерством образования РФ и правительством Республики Карелия.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ (МПО)	8
СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ	9
ХАРАКТЕРИСТИКИ МПО	11
ПРИМЕНЕНИЯ	13
Микроплазменный источник ионов	13
Точечный источник излучения	15
Миниатюрный плазмотрон.....	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	18

НОЦ «Плазма»

<http://plasma.karelia.ru/>

ПЕТРОЗАВОДСК, 2003

ВВЕДЕНИЕ

Прохождение электрического тока через газовую среду, сопровождающееся изменением состояния газа, называется газовым разрядом. Многообразие условий, определяющих исходное состояние газа (состав, давление и т.д.), внешних воздействий на газ, и расположения электродов, конфигурации возникающего электрического поля приводит к тому, что существует множество видов электрических разрядов в газах, причём законы, которым они подчиняются, сложнее, чем законы прохождения электрического тока в металлах и электролитах.

Электрический разряд в газах происходит только при наличии вызывающего ионизацию поля, и во всех случаях в формировании электрического разряда в газах особое значение имеют приэлектродные процессы, происходящие у катода и анода.

Несмотря на большой экспериментальный и теоретический материал, имеющийся в настоящее время в периодической и монографической литературе по разрядам постоянного тока, вопрос о роли анодных частей данного разряда недостаточно изучен.

В данном сообщении будут рассмотрены:

- роль анодных частей в разряде постоянного тока,
- приведены результаты исследований характеристик разряда с малым острым анодом, определяющие некоторые его возможные применения.

Форма разряда, устанавливающегося после пробоя разрядного промежутка, может быть различной в зависимости от конфигурации электродов, давления газа и внешней цепи разряда.

Электрические свойства разрядов описывают вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Полная вольтамперная характеристика, охватывающая все виды разряда, приведена на рис.1. Она содержит в себе вольт-амперные характеристики разрядов, возможных в лампах с холодным катодом.

Если в стеклянную трубку, наполненную каким-либо газом, ввести два электрода, подключённые к источнику постоянного напряжения, то, даже при небольшом напряжении ($U=100\text{В}$), сверхчувствительный прибор регистрирует протекание очень слабого тока 10^{-15}А . Ток создаётся зарядами, вытягиваемыми полем на электроды, образующимися под действием космических лучей и естественной радиоактивности.

Если облучать газ рентгеновским или радиоактивным источником, ток повысится до 10^{-6}А . При повышении напряжения ток сначала возрастает, затем

достигает насыщения (чему соответствует полное вытягивание всех зарядов, образуемых внешним источником — участок АВ на Рис. 1).

При некотором напряжении, зависящем от рода газа, давления p и расстояния между электродами d , происходит пробой и зажигается самостоятельный разряд, который не нуждается в постороннем источнике ионизации.

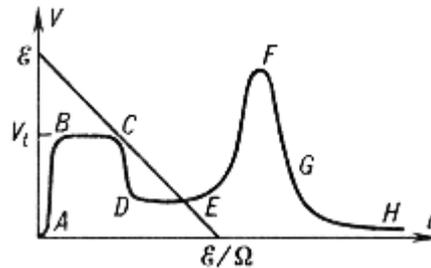


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика газовых разрядов: АВ – несамостоятельный разряд; ВС – тёмный таунсендовский, DE – нормальный тлеющий; EF – аномальный тлеющий; FG – переход в дугу; GH – дуговой; E/E – нагрузочная прямая.

На Рис. 2 показано пространственное распределение темных и светящихся зон электрического поля и других характеристик тлеющего разряда. Изменение расстояния между катодом и анодом влияет лишь на длину положительного столба, а изменение давления ведет к обратно пропорциональному изменению длины прикатодных и прианодных областей разряда.

Неотъемлемым элементом тлеющего разряда является катодный слой положительного пространственного заряда с сильным полем у катода (E/p) - 10^3 В/(см. тор) и значительным катодным падением потенциала V - (150—400)В. Именно им обусловлено так называемое отрицательное тлеющее свечение за катодом, откуда и название разряда. Положительный плазменный столб играет роль проводника, соединяющего катодные части разряда с анодом (рис.2). При уменьшении расстояния между электродами сначала сокращается именно он, потом фарадеево тёмное пространство, а катодный слой не изменяется, и лишь когда не хватает места для него (и отчасти для отрицательного свечения), горение разряда сильно затрудняется. Разряд может гореть и в сосудах замысловатой формы. Вследствие оседания электронов на стенках возникает дополнительное поле, которое векторно складывается с внешним. Силовые линии результирующего поля, протягиваясь от анода к катоду, повторяют все изгибы трубки.

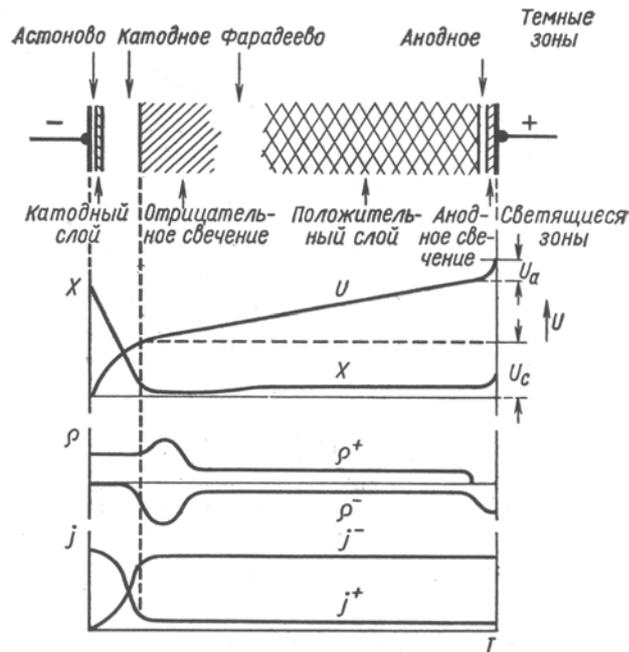


Рис. 2. Пространственное распределение темных и светящихся зон, напряженности электрического поля X , потенциала U , плотностей пространственного заряда ρ^+ и ρ^- и плотностей тока j^+ и j^- в тлеющем разряде.

Самоподдержание тока в тлеющем разряде осуществляется за счёт катодного слоя благодаря неравномерному распределению потенциала между электродами. Часть межэлектродного промежутка заполняет хорошо проводящий положительный столб со слабым полем (E/p)-(1-10) В/(см тор). Тем самым сокращается толщина области d , где должно происходить основное размножение электронов и осуществляться самоподдержание тока.

Главные отличительные признаки тлеющего разряда – катодный слой со свойственной ему структурой, область электронейтральной слабоионизированной плазмы, заполняющей пространство между приэлектродными слоями.

Анодная часть разряда является переходной областью между плазмой положительного столба и металлом анода. Ее второстепенная роль в тлеющем разряде доказывается тем, что она может отсутствовать, если анод выдвинут в катодную область. С внешней стороны это немного более темная (по сравнению с положительным столбом) область, доходящая до поверхности анода.

В пределах анодной области происходит переход от условий в положительном столбе, в котором положительные ионы движутся к катоду, к условиям около анода, где при положительном АП, ток к аноду переносится только электронами, а при отрицательном — к аноду движутся и электроны, и

ионы. Но в этом случае – ионный поток и направление противоположное направлению ионов в положительном столбе.

Так как ток на анод состоит исключительно из электронов (анод не эмитирует ионы), то вблизи анода имеется тенденция к образованию отрицательного пространственного заряда. Для того, чтобы было обеспечено поступление на анод тока, равного разрядному току, необходимо, чтобы отрицательный объемный заряд в достаточной степени был нейтрализован присутствием ионов.

На рис.3 схематически изображены кривые распределения потенциала области у анода при положительном (кривые 3 и 2) и при отрицательном (кривая 1) анодном падении. Кривая 3 относится к случаю, когда электроны у поверхности анода производят интенсивную ионизацию газа и здесь образуется тонкая светящаяся плазменная пленка, между которой и положительным столбом лежит двойной слой объемных зарядов. Кривая 2 соответствует более слабой ионизации газа у поверхности анода и присутствию у анода слоя электронного объемного заряда. Анодным падением потенциала U_a называют разность потенциалов между концом невозмущенного анодными явлениями положительного столба и анодом; протяженностью зоны АП l_a называют расстояние от конца невозмущенного положительного столба до анода.

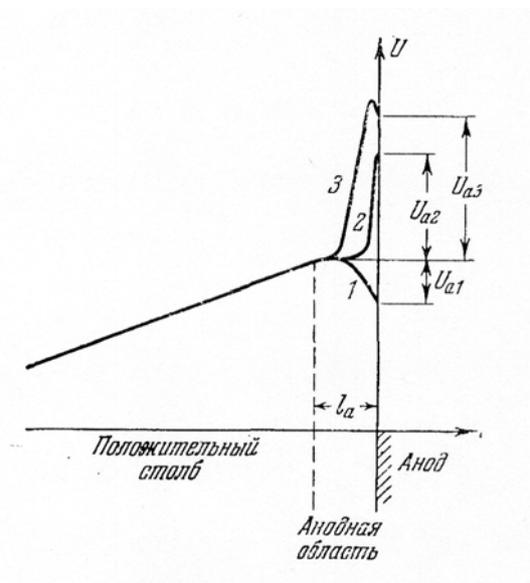


Рис.3. Схема распределения потенциала в анодной области.

1-АП отрицательно; 2-АП положительно, у анода слой отрицательного объемного заряда; 3- АП положительно, у анода тонкий плазменный слой,

ограниченный со стороны положительного столба двойным слоем объемного заряда.

В разряде с анодом небольшой площади у анода возникает сильное электрическое поле, оттягивающее от него ионы. При скорости образования ионов такой же, как в столбе, отрицательный объёмный заряд не может быть скомпенсирован и устанавливается положительное анодное падение такой величины, что ускоренные на его протяжении электроны производят дополнительную ионизацию, поставляющую необходимое количество ионов.

Электроны, пробегающие область положительного анодного падения в определенном ей месте, приобретают энергию, при которой вероятность возбуждения велика.

В обоих случаях отрицательного и положительного анодного падения соответствующее уменьшение или увеличение анодного напряжения сопровождается перераспределением напряжения между разрядной трубкой и сопротивлением, включённым во внешнюю цепь.

При положительном АП (порядка ионизационного потенциала газа и выше) анод покрыт тонкой светящейся пленкой. С повышением давления эта пленка теряет свою однородность; на ней возникают более яркие выпуклые образования – анодные пятна, имеющие полусферическую форму. При отрицательном АП или положительном АП небольшой величины свечение у анода отсутствует. Знак и величина АП зависят от формы как самого анода, так и окружающих его стенок газового пространства, от рода и давления газа, силы тока и ряда других факторов.

Все процессы в анодной области, которые увеличивают генерацию положительных ионов или замедляют их удаление, ведут к увеличению концентрации заряженных частиц и, следовательно, к уменьшению положительного АП или к образованию отрицательного АП. Примером таких процессов могут служить:

- а) местное искусственное повышение электронной температуры в анодной области;
- б) местное повышение плотности газа у анода;
- в) увеличение числа актов ступенчатой ионизации, происходящее при увеличении плотности тока или плотности газа;
- г) ослабление электрических полей в плазме у анода, вызываемое формой анода (полый анод).

Процессы, которые снижают генерацию положительных ионов или ускоряют удаление их из объема анодного пространства, ведут к исчезновению отрицательного АП или к увеличению величины положительного АП:

- а) местное искусственное снижение T_e в анодной области;
- б) местное снижение плотности газа;
- в) снижение давления и плотности газа, ведущее к исчезновению ступенчатой ионизации;
- г) усиление электрических полей в плазме у анода (анод малого размера).

Анодное падение потенциала, его знак и величина являются, таким образом, тем регулятором, который поддерживает концентрацию заряженных частиц перед анодом на уровне, обеспечивающем подведение к нему разрядного тока.

При отрицательном АП ионы уходят на анод, понижая перед ним концентрацию заряженных частиц.

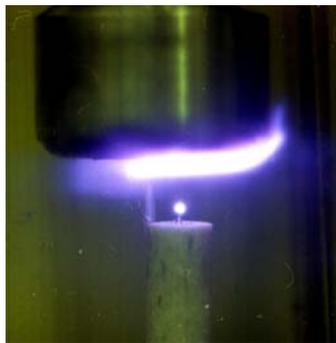
При положительном АП ионы не только не могут направляться к аноду, но их концентрация здесь увеличивается за счет усиленной ионизации газа электронами, ускоренными при прохождении положительного АП.

Анод с малой поверхностью, составляющей лишь небольшую часть поперечного сечения трубки, обладает всегда положительным АП, убывающим с ростом давления.

При низких давлениях U_a сильно увеличивается с ростом тока. Это вызвано вторичным эффектом разрежением газа перед анодом при больших плотностях тока за счет удаления молекул газа в виде ионов. На протяжении нескольких диаметров анода вокруг последнего присутствует облако заряженных частиц повышенной плотности. Равновесное существование этого облака возможно только при высокой плотности генерации ионов, так как под действием поля и одновременно диффузии они быстро удаляются из прианодной области в сторону катода. Повышенная генерация ионов осуществляется за счет ускорения электронов в полях анодной области.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ (МПО)

При выполнении определенных условий происходит локализация анодного свечения в виде сферы малого радиуса на конце заостренного анода. К этим условиям относятся параметры $\frac{d_{ak}}{r_a} \geq 200$ и $P \cdot r_a = (0.13 \div 1.33) \text{ Па} \cdot \text{м}$, где d_{ak} – межэлектродное расстояние, r_a – радиус кривизны анода, P – давление газа.



Типичная вольт-амперная характеристика разряда в гелии приведена на рис.4. Пробой разрядного промежутка происходит при $U=(1 \div 1.5) \text{ кВ}$. Напряжение горения разряда зависит от тока разряда, давления газа и межэлектродного расстояния.

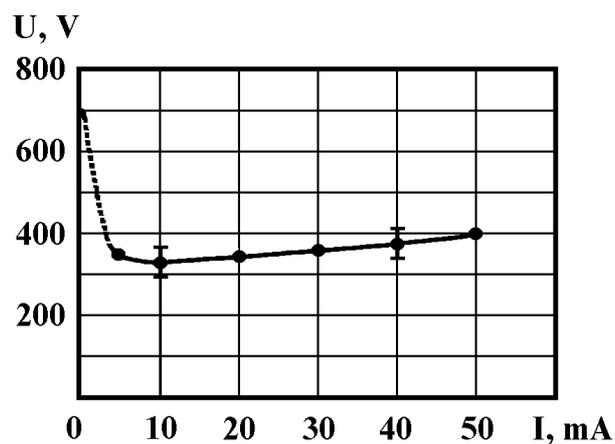


Рис.4. Вольт-амперная характеристика разряда в гелии.
Давление гелия 0.1 атм.

СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектры излучения МПО регистрировались с целью качественного анализа плазмы, позволяющего сделать выводы об эффективности процессов возбуждения атомов и ионов, а также судить о зарядности плазмы. Спектральные исследования, проведенные в атмосфере гелия при $P=1.1$ атм. и $I=20$ мА, показали наличие большого числа линий, соответствующих переходам в спектрах HeI и HeII (рис.6).

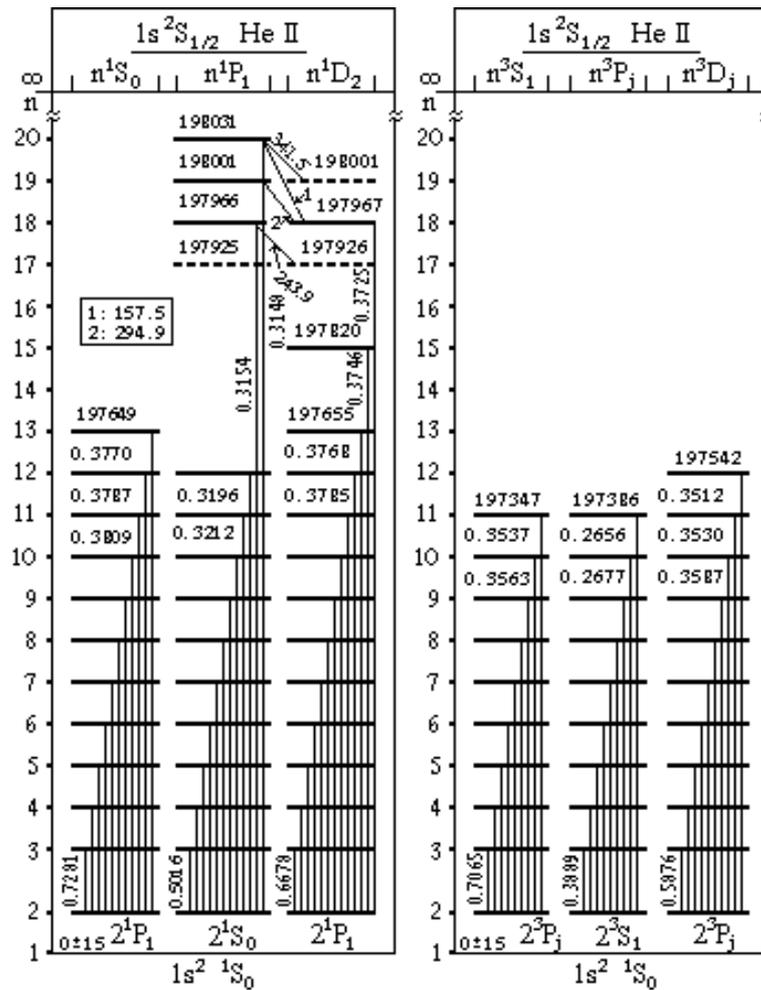


Рис.6 Схема экспериментально зарегистрированных спектральных линий He I из области МПО.

Были зарегистрированы спектры в ультрафиолетовой области в NeII, ArII, ArIII, KrII, KrIII, XeII, XeIII при давлении 0.2 атм. и токе разряда 20 мА, показавшие, что эффективно возбуждаются не только атомные уровни, но и ионные.

Возбуждение атомарных состояний гелия с высоким квантовым числом приводит к наличию в спектре излучения субмиллиметровых волн. Методом пар линий с общим верхним уровнем [4] по яркости линий видимого спектра (HeI: $\lambda=5015 \text{ \AA}$ и $\lambda=3964 \text{ \AA}$) была оценена абсолютная интенсивность излучения в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) (HeI: $\lambda=537 \text{ \AA}$ и $\lambda=522 \text{ \AA}$), которая составила $I_{\lambda=537 \text{ \AA}} = 1.1 \text{ [Вт/см}^3\text{]}$ и $I_{\lambda=522 \text{ \AA}} = 0.2 \text{ [Вт/см}^3\text{]}$.

Число квант в секунду, излучаемое МПО в ВУФ на $\lambda=537 \text{ \AA}$ и $\lambda=522 \text{ \AA}$ оценивается $\sim 10^{12}$ и $\sim 10^{11}$ фотон/с. Было установлено, что интенсивность излучения увеличивается с уменьшением давления буферного газа и ростом разрядного тока.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МПО

На Рис.7 приведено пространственное распределение интенсивности линии 388,9 нм (HeI) по радиусу МПО.

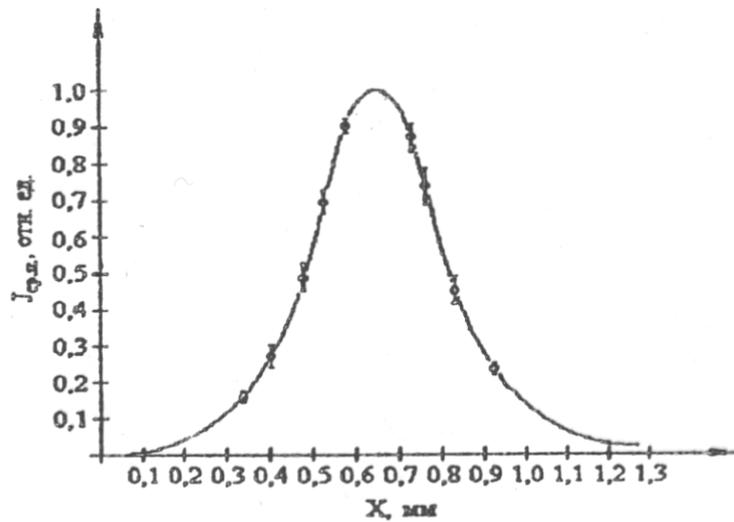


Рис.7 Пространственное распределение интенсивности линии 388,9 нм (HeI) по радиусу МПО. Гелий. $\lambda=388.9$ нм. $P=0.2$ атм. $I=30$ мА

Исследования показали увеличение размера МПО с увеличением давления и ростом разрядного тока (рис.8 а,б).

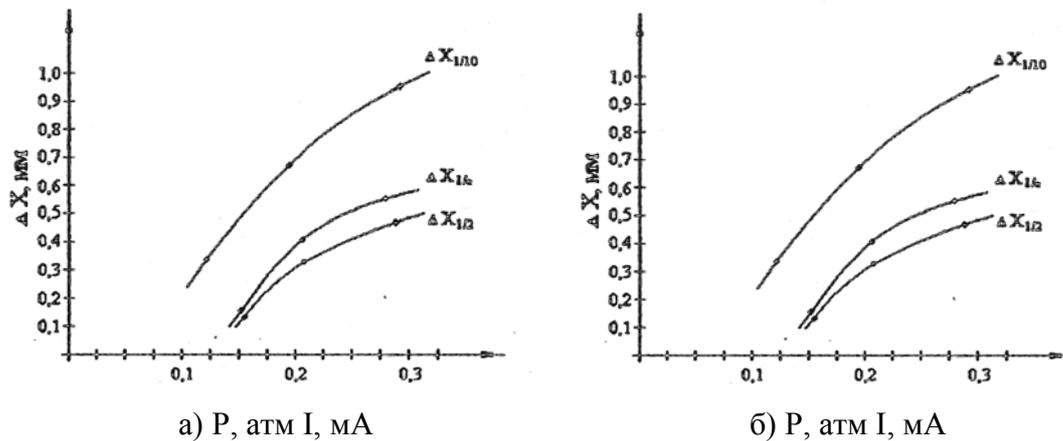


Рис.8 Зависимость ширины МПО от давления газа(а) $I=50$ мА и тока разряда(б) $P=0.2$ атм. Гелий. $\lambda=388.9$ нм.

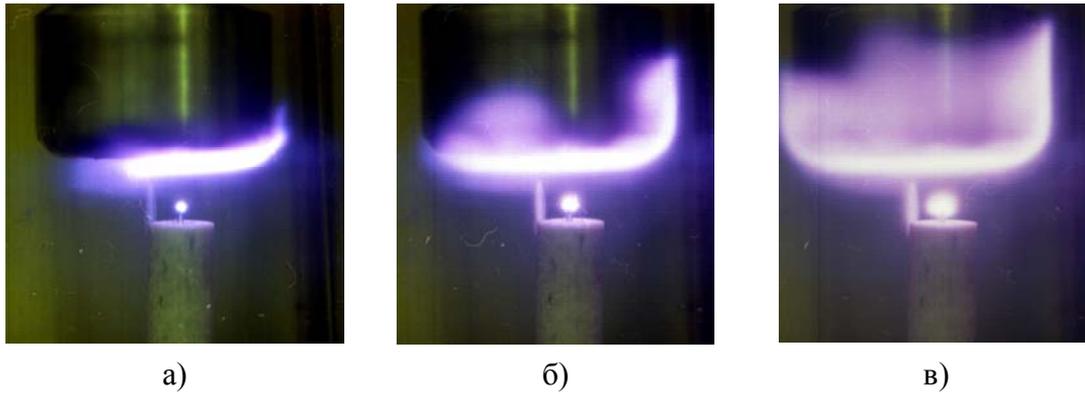


Рис. 9 Фотография МПО.
Давление гелия 30торр. Ток разряда а-5мА, б-15мА, в-30мА.

На Рис.10 приведено распределение потенциала в разряде в гелии.

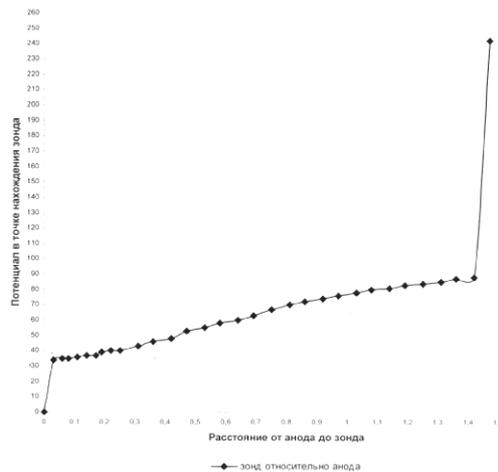


Рис.10 Распределение потенциала в разряде в гелии.
Ток разряда – 20мА; давление – 1атм.

Температура электронов в МПО, оцененная по отношению интенсивностей линий HeI: $\lambda=4921.9 \text{ \AA}$ и $\lambda=4713.2 \text{ \AA}$, при $I=10 \text{ мА}$ и $P=1 \text{ атм.}$ составляет $(10 \pm 3) \text{ эВ}$. Концентрация электронов — $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Высокая плотность мощности, вкладываемая в разряд, ($\sim 10^4 \text{ Вт/см}^3$) объясняет наличие ионных линий в спектре излучения.

ПРИМЕНЕНИЯ

Микроплазменный источник ионов

На основе разряда с острым анодом разработана конструкция простого и экономичного микроплазменного источника ионов, который может устанавливаться в любом высоковакуумном объеме с системой откачки мощностью более 100 л/с.

Интерес к источникам заряженных частиц поддерживается в связи с широкой перспективой применения их в различных областях науки и техники [1]. В частности микротехнологии требуют источники высокой яркости [2]. Одним из таких источников является жидкометаллический источник, позволяющий получать высокие значения плотности ионного тока, яркости и стабильности, значительно превышающие параметры таких классических плазменных источников, как дуоплазматрон [3]. Иной вариант генератора ионов – в работе [4] предложен капилляртон, который отличает высокая угловая плотность тока – 6 мА/ср. Схема источника приведена на Рис. 11.

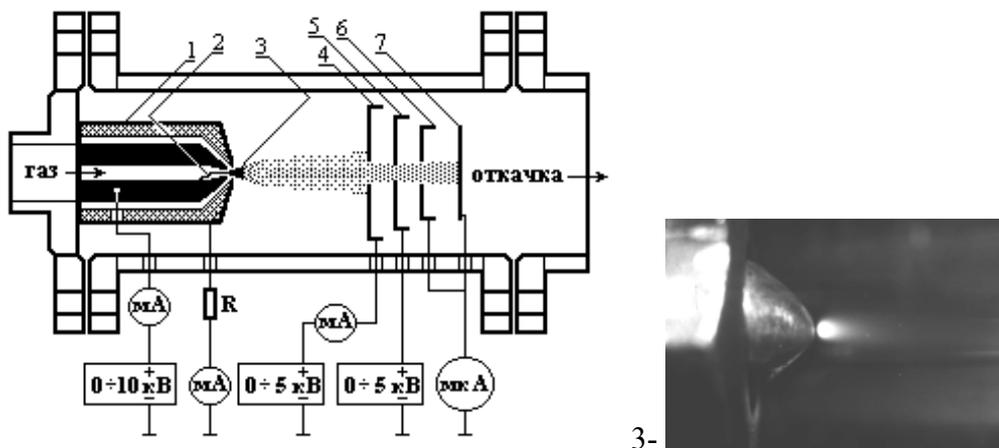


Рис. 11. Схема микроплазменного источника ионов и многоэлектродного анализатора.

1 – катод; 2 – анод; 3 – микроплазма; 4, 5, 6, 7 – электроды анализатора ионов.

В аноде микроплазменного источника имеется капиллярный канал диаметром 0.15 мм и длиной 1.5 мм. В канал введена игла. Радиус кривизны острия – 5 мкм. Давление рабочего газа 200 ÷ Торр на входе канала в экспериментах с источником позволяло на выходе канала поддерживать давление несколько Торр, требуемое для осуществления устойчивого горения разряда. При работе источника на аргоне давление в измерительной камере 10^{-3} Торр ток разряда 2 мА.

Микроплазменный участок возникал вблизи острия и имел форму слабо расходящегося конуса с ярко светящейся вершиной. Высота конуса – 3 мм, при диаметре основания – 0,6 мм. Свечение не касалось стенок отверстия катода, имеющего диаметр 1мм. Разрядный ток распределялся между катодом – 1 мА, электродом (2) – 1 мА (полный ток ионного пучка на расстоянии 30 мм от катода) и электродом (4) – 100 мкА.

Для анализа пучка частиц, выходящих из ионного источника применялся многоэлектродный зонд, работающий по принципу торможения заряженных частиц в однородном электрическом поле [5]. На Рис. 1. приведена схема зонда. Измерение энергетических распределений ионов проводилось при дискретном изменении задерживающего потенциала. Затем методом графического дифференцирования восстанавливался истинный энергетический спектр ионов. На Рис. 12 приведено распределение ионов аргона по энергиям.

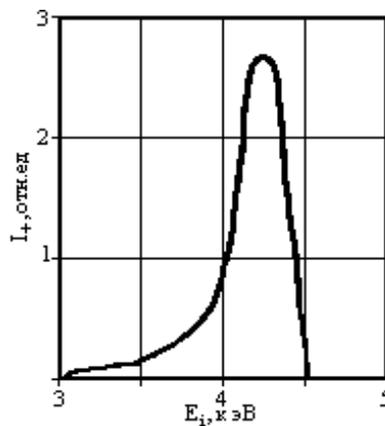


Рис. 12. Распределение ионов аргона по энергиям в пучке.

Ток разряда – 2 мА , напряжение – 4,5 кВ.

Анализ тока вторичных электронов позволил выделить долю метастабильных атомов аргона, присутствующих в пучке, и, по известному коэффициенту потенциальной эмиссии, оценить величину потока метастабильных атомов.

Технические характеристики микроплазменного источника при работе на аргоне:

- напряжение на разряде – 4 кВ; ток – 2 мА;
- плотность ионного тока – 2 мА/см^2 ;
- угловая яркость – 7,2 мА/ср;
- поток метастабильных атомов – $10^{16} \text{ 1/(см}^2 \cdot \text{с)}$;
- экономичность – 0,25 мА/Вт;
- расход газа $\leq 0,1 \text{ л/ч}$.

Простота конструкции, легкость управления, высокая экономичность, наряду с реализацией высоких плотностей ионного тока и угловой яркости,

позволяет говорить о перспективности применения микроплазменного источника ионов и метастабильных атомов в устройствах диагностики поверхности и технологиях размерной обработки при производстве изделий электронной техники.

Точечный источник излучения

Исследования точечного источника излучения (ТИИ) [1] (рис13) на основе микроплазменного образования (МПО) [2, 3] показали, что яркость источника с гелиевым наполнением составляет $2 \cdot 10^4$ Кд/м², что указывает на перспективность его применения в газоразрядных индикаторных приборах, характерные величины яркости свечения которых в настоящее время составляют $500 \div 800$ кд/м². Таким образом, вышеприведенные характеристики МПО и стабильность его работы подтверждают возможность использования его в качестве точечного источника высокой яркости в спектрометрии и газоразрядных индикаторных приборах.

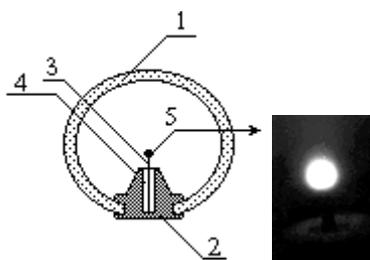


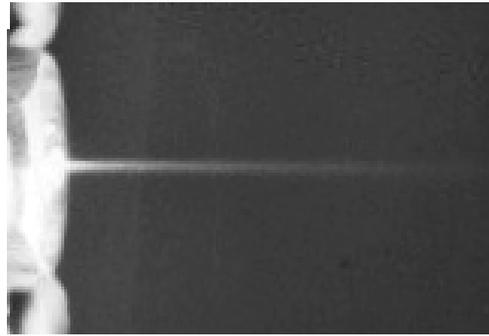
Рис. 13. Точечный источник излучения (ТИИ)

Используемые в спектрофотометрической аппаратуре газоразрядные спектральные лампы имеют ряд недостатков. Главные из них — малый телесный угол излучения и большие размеры источника, несогласованные с требованием к пространственной когерентности.

В маломощных разрядах к буферному газу часто добавляют ртуть, щелочные и щелочноземельные металлы, которые имеют в ультрафиолетовой области ряд линий и повышают интенсивность излучения. Зарегистрированный спектр излучения смеси He-Hg подтвердил эффективное возбуждение атомных (He I и HgI) и ионных (HeII и HgII) состояний, а также состояний двухзарядных ионов (HgIII).

Миниатюрный плазмотрон

Микроплазмотрон состоит из газоразрядной проточной ячейки, системы газообеспечения и источника питания. Газ в межэлектродный промежуток подается через игольчатый нагнетатель-сопло, являющийся анодом ячейки. При давлении на входе сопла, превышающем атмосферное, на выходе



сопла зажигается разряд с характерным плазменным образованием, которое при увеличении давления вытягивается в тонкий плазменный шнур (диаметр – до одной десятой миллиметра, длина – до 20 миллиметров), размер которого определяется параметрами сопла. При давлении 2 – 4 атм, токе разряда 5 – 30 мА, напряжении – 400 – 800 В, мощность струи составляет сотни мВт – единицы Вт и регулируется мощностью, вкладываемой в разряд, и расходом рабочего газа.

На рис.14 приведена зависимость длины микроплазменной струи от величины разрядного тока (рабочий газ – гелий, расход газа 1.1 л/мин).

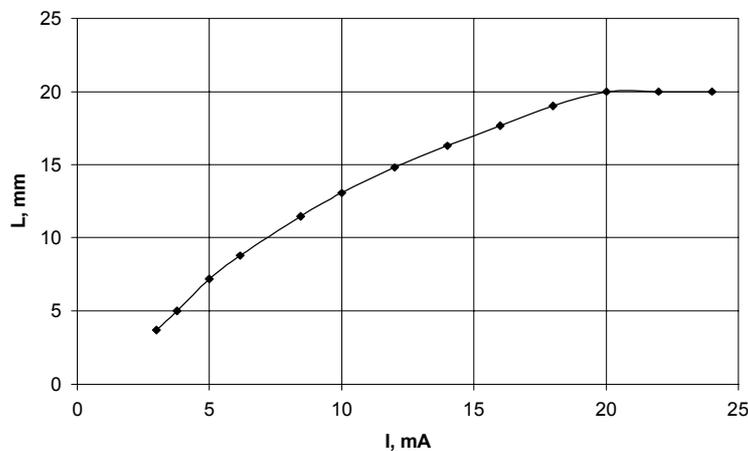


Рис. 14. Зависимость длины струи от величины разрядного тока

С помощью микротермодатчика МТ-54 измерялась среднемассовая температура в плазменной струе. Распределение температуры по длине струи представлена на Рис. 15.

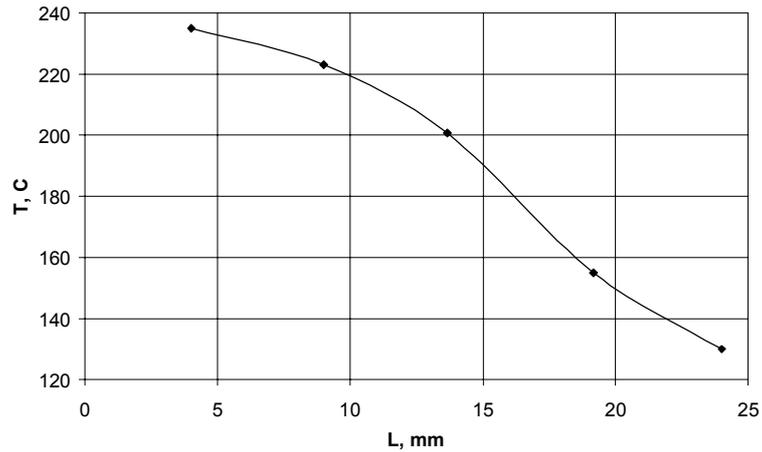


Рис.15. Распределение температуры по длине струи (рабочий газ – гелий, ток разряда – 10 мА, расход газа – 1 л/мин).

Динамическое давление микроплазменного потока измерялось с помощью баллистического маятника. На Рис. 16 приведены результаты измерения величины динамического давления в потоке рабочего газа без плазмы и с плазмой (рабочий газ – гелий, расход газа – 1.1 л/мин разрядный ток – 20 мА).

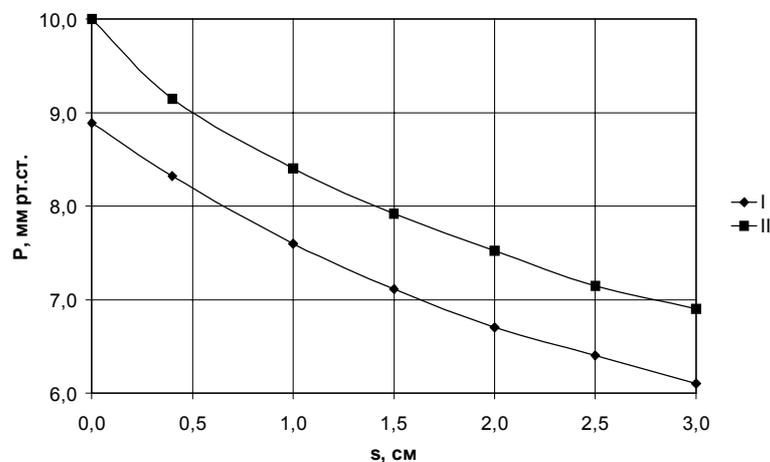


Рис. 16. Зависимость динамического давления от расстояния между баллистическим маятником и соплом микроплазмотрона. I – воздействие только рабочим газом; II – воздействие микроплазменной струей.

Был измерен спектр излучения плазменной струи, в котором были идентифицированы 18 линий, принадлежащих спектрам плазмообразующего газа – гелия и атмосферного азота. Наибольшую интенсивность имеет полоса атмосферного азота в УФ – области спектра (337нм).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н., Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических применений. М., Энергоатомиздат, 1986.
 2. Броудай И., Мерей Дж., Физические основы микротехнологии. М., Мир, 1985.
 3. Габович М.Д. Жидкометаллические эмиттеры ионов. УФН. т 140, вып. 1, с 137.
 4. Mahoney J. F., Perel J. and Forrester A. T. Capillaritron. A new, versatile ion source. Appl. Phys. Lett. 38 (5), 1981.
 5. Козлов И.Г., Современные проблемы электронной спектроскопии. М., Атомиздат, 1978.
-
- [1] Гостев В.А., Сысун В.И., Хромой Ю.Д. “Точечный источник излучения”, АС СССР, №1108957, кл H01J61/10, 1987
 - [3] Gostev V.A., Mamkovitch V.V., Sysun V.I., XXIII International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Contributed papers, vol. 5, p. 80, Toulouse, 1997.
 - [4] Зайдель А.Н., Шрейдер Е.Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение, Москва, 1976.