

УДК 543.420.62; 546.57; 546.59; 546.91

ДУГОВЫЕ ПЛАЗМАТРОНЫ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

А.П. Тагильцев*, Е. А. Тагильцева

Белгородский государственный университет,
308007, г. Белгород, ул. Студенческая, 14

Стремление снизить пределы обнаружения в спектральном анализе обозначило разработку двух направлений генераторов плазмы: безэлектродные ВЧ-разряды и дуговые плазматроны. Развитие первого направления привело к созданию ИСР-плазматрона, второе направление – двухструйного дугового плазматрона. Показано, что решающую роль достижения низких пределов обнаружения играют температура источника возбуждения спектров и геометрия плазмы, когда проба вводится в центральную, сравнительно более холодную зону, окруженную горячими стенками плазмы. В работе представлен обзор конструкций дуговых плазматронов.

Введение

Первыми источниками возбуждения спектров для анализа веществ являлись пламена, дуга и искра. Спектрометры на этих непрерывно совершенствующихся источниках, называемых «традиционными», применяются и по настоящее время. Пламена, в основном, используются для анализа растворов. Высокая пространственно - временная стабильность пламени обуславливает хорошую воспроизводимость анализа. Основным вариантом эмиссионного анализа порошковых проб и на сегодняшний день является испарение пробы из кратера графитового электрода дуги постоянного и переменного тока. Практикуется также непрерывная подача порошковой пробы в дуговой разряд (вдувание, просыпка), при этом достигается высокая экспрессность и воспроизводимость анализа. Искровой источник применяется чаще всего для серийного анализа металлов и сплавов, состав которых колеблется в сравнительно узких пределах.

Однако упомянутые источники возбуждения спектров – дуга, искра, пламя – уже не могли удовлетворить все возрастающим требованиям производства. Необходимо было развитие новых источников света, обладающих повышенной стабильностью и эффективностью процессов атомизации и возбуждения пробы.

Свойства, которые желательны в идеальном источнике возбуждения спектров:

- низкие пределы обнаружения;
- способность возбуждения линий большого числа элементов;
- высокая пространственно - временная стабильность зоны возбуждения;
- высокая воспроизводимость анализа;
- анализ проб, находящихся в любом агрегатном состоянии;
- независимость условий возбуждения от состава пробы.

Посылка о том, что эти свойства (или часть из них) можно получить путем повышения температуры плазмы в аналитической зоне, привела к разработке плазменных источников возбуждения спектров. Работы развивались в двух направлениях: 1) использование различных высокочастотных индукционных и емкостных разрядов, 2) создание плазматронов на базе дуги постоянного тока.

Были разработаны и исследовались плазматроны, использующие ВЧ-емкостный разряд [1], ВЧ-факельный разряд [2], ВЧ-индуктивный разряд [3]. Использование в качестве источника энергии СВЧ-генератора (магнетрона) привело к созданию СВЧ-плазматронов [4]

* Tagiltsev@edu.ru

Наибольший успех выпал на долю разработчиков плазматронов с высокочастотной индуктивно связанной плазмой, ИСП-плазматронов [3].

Успех ИСП-плазматрона связан не только с высокой (~10000 °К) температурой плазмы, но и с удачной ее геометрией, обеспечивающей большое время жизни излучающих атомов в аналитической зоне.

Первые ИСП-плазматроны появились в 40-х годах прошлого столетия. Генерировали они обычный факел плазмы. Результаты определения малых содержаний элементов были хуже, чем в дуге. Это был рядовой источник возбуждения спектров. Когда в 1964 году на него поставили списанный из армии высокочастотный генератор, то рабочая частота генератора оказалась удовлетворяющей появлению скин-эффекта и превратила плазменный факел в плазменную трубу. Пределы обнаружения элементов-примесей улучшились сразу в 10000 раз. ИСП-плазматрон из рядового источника возбуждения спектров превратился в лидера аналитического приборостроения.

Многочисленные исследователи, организации и фирмы довели до совершенства сам источник, его электрическое питание, устройства подачи пробы, спектральную аппаратуру и фотоэлектрическую регистрацию спектров.

На сегодняшний день это, пожалуй, самый популярный источник для спектрального анализа. Основные его достоинства следующие:

а) идеальная конфигурация плазмы – проба вводится в плазменную трубу, проходит горячую область, атомизируется и попадает в бестоковую область с малым фоном и почти оптимальной температурой;

б) высокая стабильность факела;

в) отсутствие реабсорбции и как следствие - большой интервал (4 порядков) линейности градуировочных графиков;

г) низкие пределы обнаружения, являющиеся в настоящее время эталоном сравнения для других источников возбуждения спектров.

Несмотря на всю привлекательность, высокочастотные индукционные плазматроны имеют недостатки:

– исследуемую пробу надо обязательно переводить в раствор, что не всегда доступно аналитику;

– сравнительно высокая стоимость спектрометра

Требование перевода пробы в раствор связано, прежде всего, с ограничением мощности питающего генератора, что ведет к ограничению количества пробы, которую можно вводить в аналитическую зону плазматрона. Попытки увеличить расход пробы приводят к срыву генерации и нестабильности работы плазматрона.

Для нужд геологии, почвоведения, порошковой металлургии, экологических служб нужен был источник, который бы позволял анализировать растворы и порошки, без перевода их в раствор, с низкими пределами обнаружения, недоступными для «традиционных» источников.

Поэтому не прекращались исследования по разработке дуговых плазматронов, которые и привели к созданию конкурентоспособной модели двухструйного дугового плазматрона.

1. Плазматроны с газовой стабилизацией

Первые дуговые плазматроны, предназначенные для спектрохимического анализа, были разработаны независимо друг от друга Маргошисом и Скрибнером [5], Королевым и Вайнштейном [6].

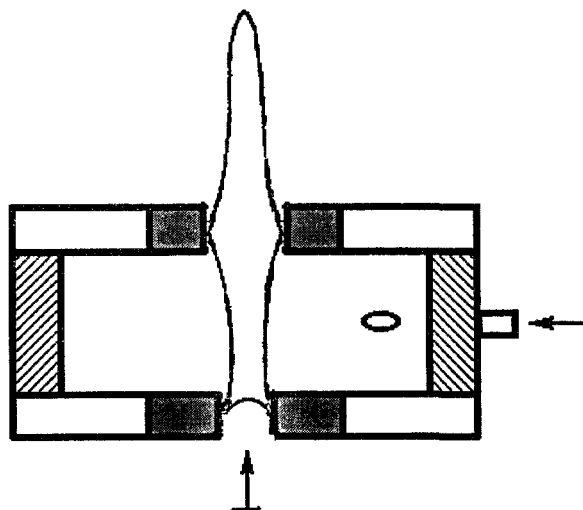


Рис. 1. Плазматрон Маргошиса и Скрибнера

Плазматрон Маргошиса и Скрибнера (рис. 1) содержал графитовые дисковые электроды (верхний – катод, нижний – анод). В качестве плазмообразующего газа использовался гелий, который вводился тангенциально в межэлектродное пространство. Проба в виде аэрозоля подавалась снизу с помощью пневматического распылителя, находящегося в непосредственной близости от плазмы. Взаимодействие аэрозоля с плазмой происходило, главным образом, при прохождении сопла и в струе. Плазматрон работал при силе тока 10 - 25А. Повышение силы тока вело к росту интенсивностей линий, но при этом резко ухудшалась работа распылителя – он часто засорялся из-за отложения солей на выходном отверстии. Отмечено усиление по сравнению с дугой и пламенем ионных линий металлов, однако особых надежд на повышение чувствительности не было (20 - 40 мкг/мл).

Устройство Королева и Вайнштейна (рис. 2) подобно устройству Маргошиса и Скрибнера. Однако в этом плазматроне в качестве тангенциального газа применен азот.

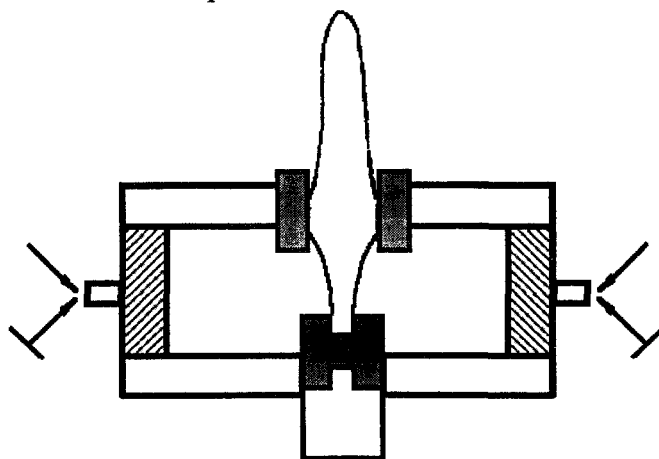


Рис. 2. Плазматрон Королева и Вайнштейна

Образцы растворов распылялись в распылительной камере, и аэрозоль подавался в разряд вместе с азотом. Кроме растворов анализировались и порошки, которые набивались в нижний электрод.

Отмечалась более высокая воспроизводимость интенсивности линий по сравнению с дугой постоянного тока и импульсной дугой. Позже Кварацхели [7] пробовал анализировать порошки вдуванием, но из-за комкования и налипания частиц порошка

на электроды результаты оказались неудовлетворительными. Основным недостатком плазматронов [5, 6] – нестабильность плазменной струи, связанная с хаотическим перемещением катодного пятна.

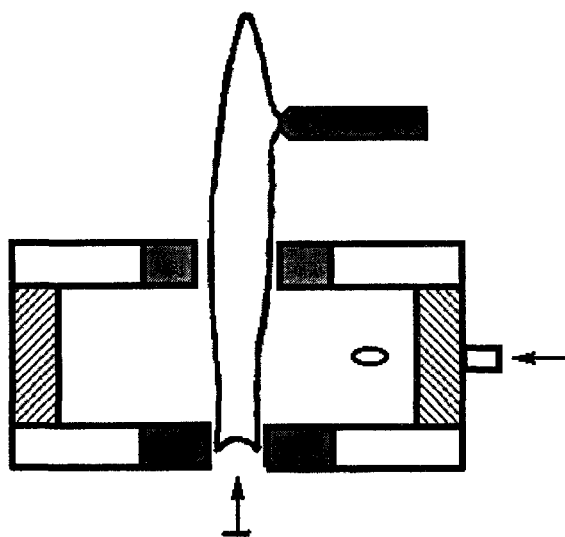


Рис. 3 Плазматрон Оуэна

В работе, опубликованной в 1961 году, Оуэн [8] показал, что значительное улучшение в стабильности плазменной струи может быть достигнуто путем введения дополнительного электрода, который находится под тем же потенциалом, что и катодное кольцо (рис. 3). Дуга в этом устройстве зажигалась последовательно: сначала между анодом и катодным кольцом, а затем, когда плазменная струя достигала дополнительного электрода, перемещалась на этот стержневой катод. Как и в первой конструкции Маргошиса и Скрибнера, аэрозоль в этом плазматроне вводился в электродную камеру снизу. Расход плазмообразующего газа (гелия) – 20 л/мин, расход аргона на распылитель растворов – 3 л/мин. Напряжение на дуге – 95В, рабочий ток – 25А. Недостаток, который остался от прежних устройств, – неудовлетворительная работа распылителя.

Чемпену [9] удалось повысить чувствительность анализа путем замены распылителя прямого впрыскивания на распылитель с камерой предварительного смешивания. В этой камере происходит оседание и удаление крупных капель аэрозоля, а в плазму поступает только мелкодисперсный аэрозоль. Попутно улучшилась надежность работы установки, так как были устранены частые засорения распылителя. Пределы обнаружения для многих элементов составили 0,1 - 0,5 мкг/мл. Ресурс непрерывной работы плазматрона возрос до 2 часов.

Интересную попытку значительного увеличения времени взаимодействия аэрозоля с плазмой, повышения чувствительности анализа и уменьшения межэлементных влияний путем придания плазме специальной геометрии предприняли в 1975 году Рипетоу и Вickers [10]. В их устройстве дуга горела между стержневым вольфрамовым катодом (рис. 4, верхний электрод) и кольцевым графитовым анодом.

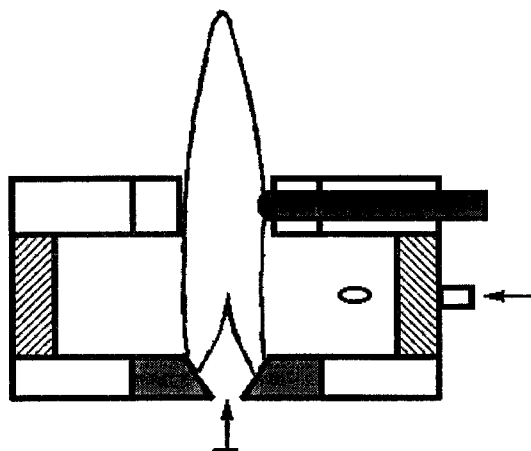


Рис. 4. Плазматрон Рипетоу и Викерса

Под действием тангенциального газового потока (аргон - 6,4 л/мин) дуговой разряд начинал быстро вращаться на аноде (частота до 600 Гц) и принимал вид колокола. Аэрозоль подавался снизу под колокол через анод. Применялось ультразвуковое распыление раствора с последующим осушением. Максимальная температура плазмы – 5000 °К. Пределы обнаружения составили от 0,02 мкг/мл для Al до 2,0 мкг/мл для Cd. Желаемой чувствительности получить не удалось из-за ограничения на расход транспортирующего аэрозоль газа (0,54 л/мин). Попытки увеличить расход газа и вместе с ним поступающей пробы приводили к уменьшению частоты вращения дуги, которое можно компенсировать увеличением расхода тангенциального газа, но это охлаждает плазму и ухудшает пределы обнаружения примесей.

2. Плазматроны со стабилизацией стенкой

Ямамото [11] описал плазменную струю, образованную между центральным вольфрамовым электродом (рис.5) и медным соплом, охлаждаемым водой, т.е. использовал стабилизацию стенкой.

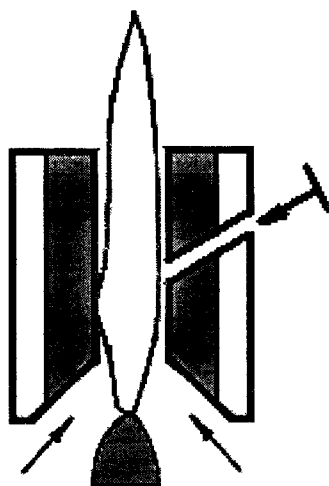


Рис. 5. Плазматрон Ямамото

Тангенциальный поток аргона (до 30 л/мин), введенный вокруг вольфрамового катода, и противоположный поток аргона (5 л/мин), несущий аэрозоль, были сбалансиро-

рованы таким образом, чтобы анализируемый раствор не попадал на электроды. При токах дуги до 500А анодное пятно было диффузным. Эрозии анода не наблюдалось. Оценка температуры плазмы дала $> 10000^{\circ}\text{K}$. Пределы обнаружения на этом плазматроне составили ~ 10 мкг/мл, относительная погрешность – 3%.

Энгельштом В.С. и др. [12] разработан одноканальный плазматрон с длительным ресурсом работы (сотни часов) и высокой стабильностью, в котором анализировались не только растворы, но и порошки. Дуговой разряд в плазматроне осуществляется между медным анодом (рис. 6) с вершиной у входа в сопло и кольцевым катодом из вольфрама, установленным у выхода из сопла.

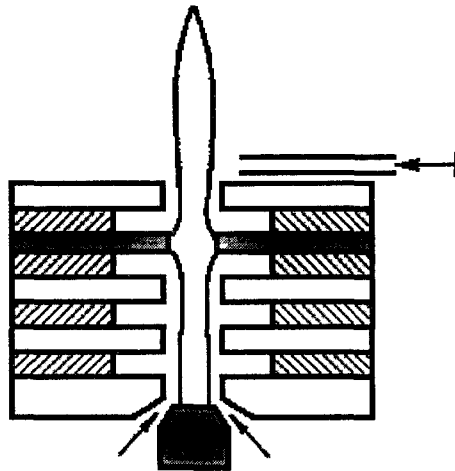


Рис. 6. Одноканальный плазматрон В.С. Энгельшта

Нейтральная шайба над катодом служит для защиты катода от разрушающего действия кислорода атмосферы. Сопло плазматрона состоит из набора медных диафрагм, изолированных друг от друга газовыми уплотняющими резиновыми прокладками. Длина конического сопла – 25 мм. Электрическая дуга горит в сопле с аксиальным потоком аргона. Рабочий ток – 80А, напряжение на дуге – 90В, расход аргона – 6 л/мин. Введение анализируемого вещества происходит в основание плазменной струи сбоку в виде тонкой струйки раствора или аэрозвеси порошка. Пределы обнаружения в порошковых пробах $n \cdot 10^{-3} - n \cdot 10^{-7} \%$, в растворах – 0,1 - 0,01 мкг/мл.

3. Факельные плазматроны

Большой интерес представляют устройства, генерирующие протяженные ламинарные бестоковые потоки плазмы, имеющие вид факела. Эти потоки имеют малую скорость истечения из-за больших отверстий в сопле плазматрона и малых расходов газа. Температура плазмы в таких потоках обычно невелика (менее 5000°K); но зато значительно увеличивается время пребывания частиц пробы в зоне возбуждения, что в итоге ведет к снижению пределов обнаружения.

Кранц [13] разработал плазматрон, в котором дуга (рис.7) зажигается между угольными или вольфрамовым и медным электродами. Плазмообразующий газ вводился тангенциально в противоположных направлениях у катода и анода. Горизонтальный участок дуги полностью закрыт металлическим кожухом, кроме вертикального отверстия, перпендикулярного дуге. Пламеподобная плазменная струя, выходящая из этого отверстия достигает 20 см в длину при расходе азота 5-12 л/мин и токе 20-60А. Скорость струи – 100 м/с, температура плазмы на выходе у сопла 6500°K . Устройство интересно еще и тем, что любая примесь, испаряющаяся из электродов, выбрасывается через радиальные отверстия и не загрязняет плазму. Анализируемая проба в виде аэрозоля, получаемого в пневматическом распылителе камерного типа, вводится у основания плазменной струи сбоку.

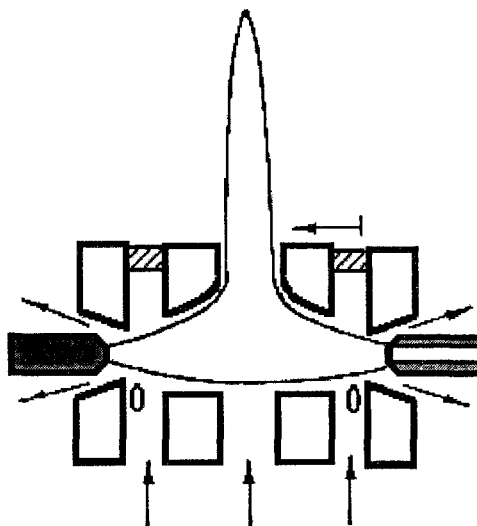


Рис. 7. Плазматрон Кранца

Плазматрон Кранца может работать в течение многих часов без загрязнения плазмы материалом электродов. Пределы обнаружения оказались на уровне 1-10мкг/мл.

Идея Кранца об использовании бестокового факела для снижения пределов обнаружения спектрального анализа оказалась плодотворной и получила развитие в других устройствах. В 1975 году Рипетоу и др. [14] описали устройство плазменной струи, которое показано на рис. 8.

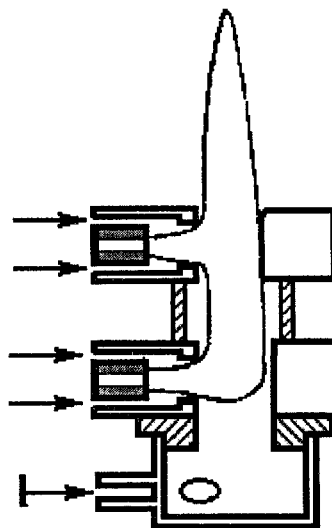


Рис 8. Плазматрон Рипетоу

Катод и анод в этом плазматроне графитовые, аргон подается вдоль электродов (2,5 л/мин). Рабочий ток – 11А, напряжение – 72В, межэлектродное расстояние – 2,5 см. Два пневматических распылителя одновременно распыляют анализируемый раствор и раствор КС1 в U-образную трубу, смешанный аэрозоль подается тангенциально в камеру, находящуюся ниже дугового столба. Расход газа на оба распылителя – по 4,9 л/мин. Факел плазмы имеет длину 35 мм и диаметр у основания 12 мм. Введение хлористого калия в дугу делает плазму диффузной и способствует лучшему проникновению в нее частиц пробы. Малая скорость плазмы обеспечивает длительное пребывание пробы в

зоне возбуждения. На этом устройстве получены пределы обнаружения от 2 до 10^{-3} мкг/мл, конкурирующие с результатами атомной абсорбции. Недостаток устройства – проба вводится в электродную камеру и, очевидно, загрязняет стенки камеры.

Королевым В.В. и др. [15] предложен оригинальный факельный плазматрон с межэлектродным промежутком более 50 мм (рис. 9). Плазматрон имеет графитовый

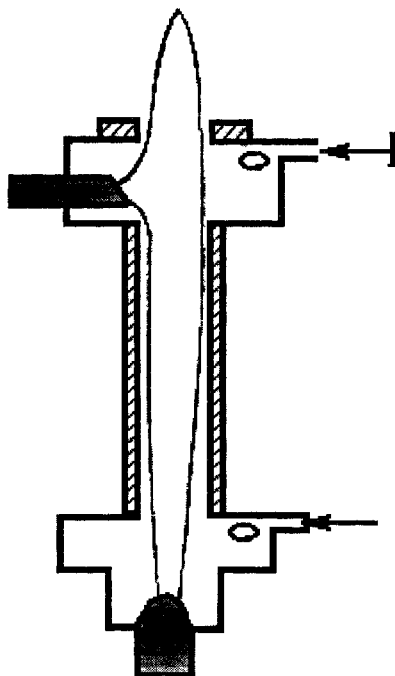


Рис. 9. Факельный плазматрон Королева и др.

анод, установленный в анодной вихревой камере, в которую поступает аргон. Графитовый катод устанавливается перпендикулярно аноду и находится в катодной камере. Введение осушенного аэрозоля осуществляется тангенциально стенке катодной камеры. Благодаря большому межэлектродному промежутку, удалось уменьшить полный расход аргона до (1 - 0,5 л/мин) при потребляемой мощности в 1,5 Квт. Пределы обнаружения элементов составляют 1 – 0,01 мкг/мл.

Несмотря на низкие пределы обнаружения, факельные плазматроны не нашли широкого применения из-за присущих им недостатков – работа только с осушенным аэрозолем, и введение пробы в камеру не гарантирует чистоты плазмы.

4. Плазматроны с отдельными электродными камерами

Устройство, сходное с оуэновской дугой [8], стабилизированной с помощью газа, было описано Элиоттом [16] и предложено как модель “Spectrajert” фирмой SMI. Как показано на рис. 10, вольфрамовый стержень катода смещен с центральной оси дугового столба, образуя в столбе дуги изгиб почти в 90° . Пламеподобная плазма образовывалась над изогнутой первичной дугой. В отличие от оуэновской дуги в этом устройстве осуществлялся поддув газом обоих электродов: и анода и катода. Осушенный аэрозоль подавался в анодную камеру с тангенциальным потоком аргона. Полный расход аргона – 5 л/мин, мощность источника – 500 Вт. Элиоттом достигнуты низкие пределы обнаружения ($4 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-4}$ мкг/мл); можно предположить, что немалую роль здесь сыграло использование высокоразрешающего сканирующего спектрометра.

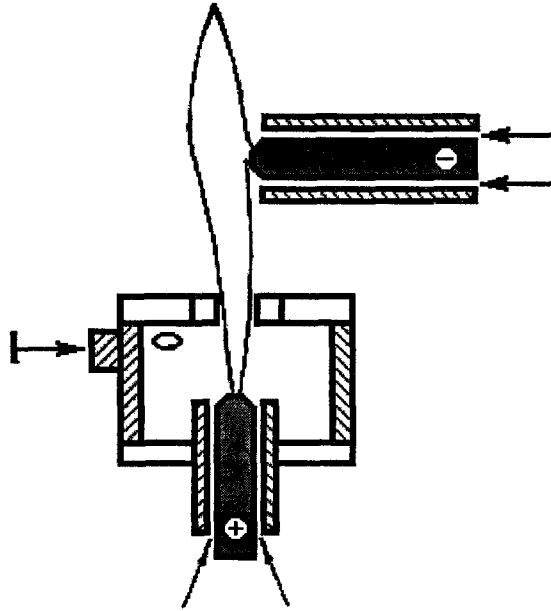


Рис. 10. Плазматрон Элиотта "Spectrajel"

Эта модель плазматрона нашла применение в практике аналитических лабораторий.

Валенте и Шренком [17] в 1970 году был предложен двухструйный плазматрон (рис. 11), в котором первичные плазменные струи создавались внутри электродных камер и затем соединялись в одну пламеподобную плазму, имеющую вид перевернутой буквы "V".

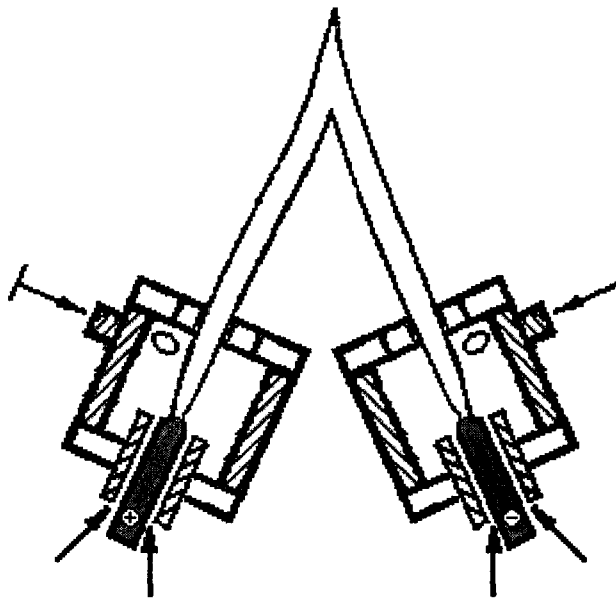


Рис. 11. Плазматрон Валенте и Шренка

Осушенный аэрозоль подавался вместе с плазмообразующим газом (аргоном) тангенциально в анодную камеру. Катодная камера идентична анодной, за исключением того, что в нее не вводится проба. В режиме работы электродные камеры устанавливались таким образом, что между струями плазмы был угол 30° . Измерения интенсивностей линий проводились в анодной струе и над вершиной изогнутой дуги. Необходи-

димое количество аргона было менее – 2,5 л/мин, рабочий ток – 10А, напряжение – 120В. Пределы обнаружения составили 0,4-0,002 мкг/мл, относительная погрешность анализа – 0,7%. Несмотря на очень хорошие аналитические характеристики, эта модель не нашла практического применения из-за технического несовершенства конструкции в целом.

Плазматрон фирмы SMI “Spectrajel II”, разработанный Элиоттом [18] также имел конфигурацию дуги в виде перевернутой буквы “V” (рис. 12). Дуга в этом устройстве горела между вольфрамовыми электродами, частично отведенными в керамические трубки, через которые протекал охлаждающий газ - аргон. Проба в виде аэрозоля, получаемого с помощью пневматического распылителя камерного типа, т.е. с отсевом крупных капель раствора, подавалась под вершину перевернутой “V”. В отличие от всех вышеописанных устройств зона наблюдения (возбуждения) в этом устройстве находилась ниже дугового столба, несущего ток. Попадая под вершину изогнутой дуги, частицы аэрозоля тормозятся, испаряются, атомизируются и возбуждаются. Зона возбуждения характеризуется температурой 5500°K, малым фоном, что позволяет получать низкие пределы обнаружения элементов ($5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ мкг/мл). Достоинством этого устройства, кроме низких пределов обнаружения, является то, что анализируемая проба подается вне электродных узлов, поэтому нет опасности заражения плазмы парами предыдущей пробы.

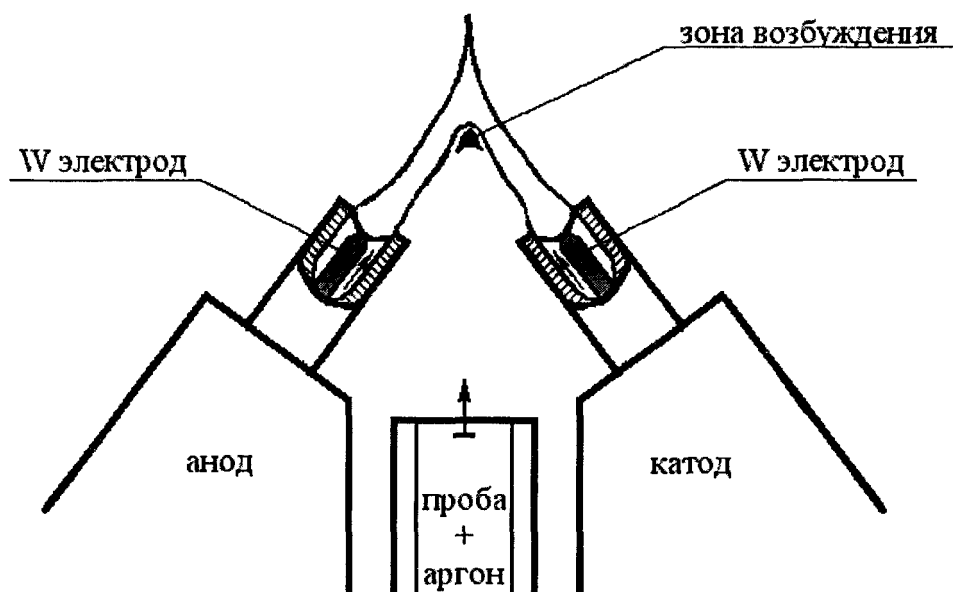


Рис. 12. Плазматрон Элиотта “Spectrajel II”

Плазматрон прост по конструкции и надежен в работе, поэтому сразу появилось много сообщений о практическом применении “Spectrajel II” для анализа различных объектов.

Плазматрон “Spectrajel II” имеет и недостатки. Исследователями отмечалось, что зона возбуждения в этом плазматроне мала (~ 1 мм) и пространственно нестабильна. Значительная эрозия вольфрамового анода требует после каждых двух часов работы выключения плазматрона и новой установки электродов. Велики также спектральные помехи, связанные с эмиссией вольфрама.

В 1979 году фирмой SMI была предложена новая модель дугового плазматрона “Spectrajel III” [19]. Плазматрон (рис. 13) представляет собой электрическую дугу постоянного тока, горящую в атмосфере аргона между одним общим катодом и двумя отдельными анодами. Аноды выполнены из графита, заключены в керамические труб-

ки и установлены под углом друг к другу; вольфрамовый катод также заключен в керамическую трубку.

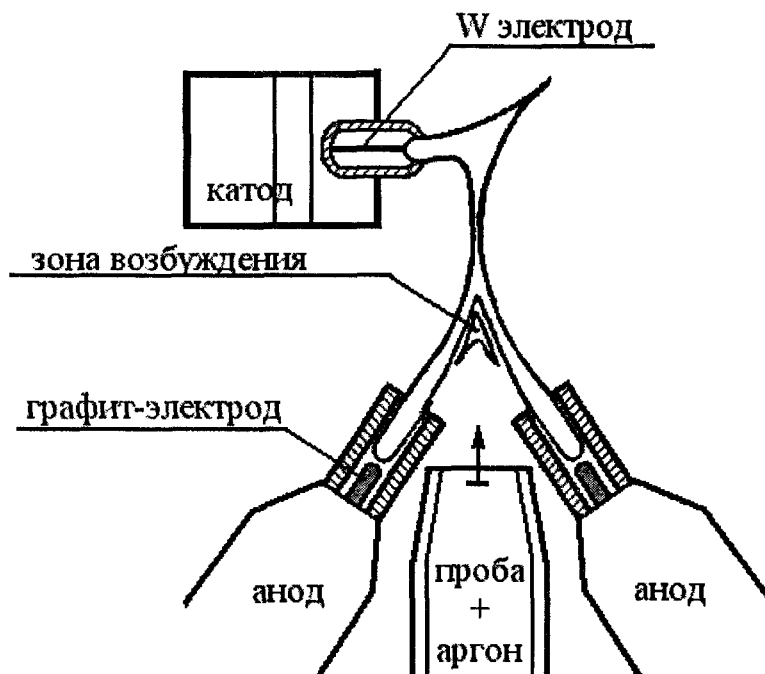


Рис. 13. Плазматрон “Spectrajel III”

В цепи каждого анода – ток разряда 7А; электроды обдуваются аргоном: по 1 л/мин аноды и 2,0 л/мин – катод. Пробу в виде аэрозоля вводят потоком аргона (4 л/мин) между двумя анодами по направлению к катоду. В итоге плазма имеет форму перевернутой буквы “У”. Для питания плазматрона используются два источника постоянного тока.

Плазматрон “Spectrajel III” имеет перед предыдущей моделью ряд преимуществ: лучшая пространственно-временная стабильность зоны возбуждения, более длительный ресурс работы и чистая от вольфрама плазма благодаря использованию графитовых анодов, более низкие пределы обнаружения (0,01 – 0,001 мкг/мл). Благодаря своим достоинствам данный плазматрон получил широкую популярность. Появилось много публикаций, посвященных его исследованию и практическому применению.

Недостатки плазматрона: по-прежнему малая аналитически пригодная область плазмы (0,5 мм²), положение которой в пространстве сильно зависит от расходов газа на головки плазматрона, электроды – расходоуемые, обязателен перевод анализируемой пробы в раствор.

5. Двухструйный плазматрон

Идея Valente [17] двухструйного плазматрона была развита Энгельштом и сотр.[20]. Был использован опыт работы с мощным одноканальным плазматроном [12].

Электродные головки предложенного ими двухструйного плазматрона (рис. 14), содержат сопло, состоящее из трех медных диафрагм. Анод плазматрона медный, катод – вольфрамовый. В электродные камеры подается защитный газ – аргон, между диафрагмами – плазмообразующий (аргон, воздух, водород и др.).

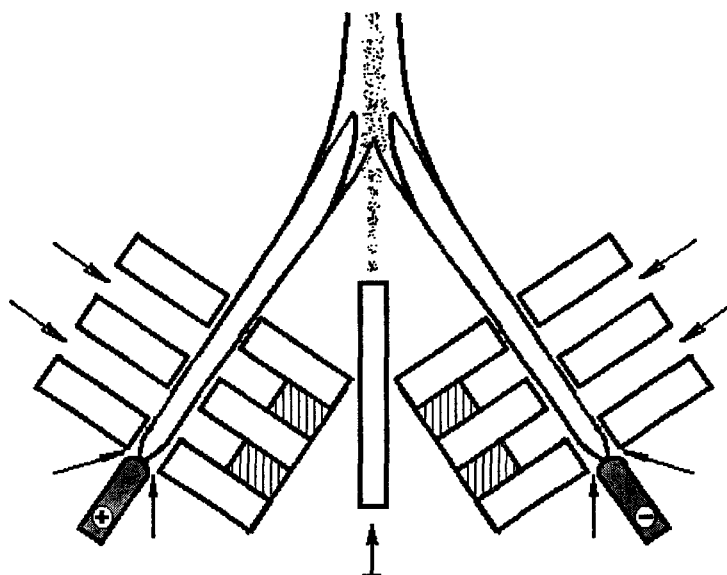


Рис. 14. Двухструйный плазматрон В.С. Энгельшта и др.

Диффузная привязка анодного пятна позволила создать безэрозионный анодный узел. Эрозия вольфрамового катода настолько мала, что позволяет эксплуатировать плазматрон сотни часов без замены (перемещения) электрода. Практически это плазматрон с нерасходуемыми электродами. Рабочий ток плазматрона – 80-100 А, напряжение на дуге – 120 В. Тагильцевым А.П. [21] разработана электронная система зажигания дуги плазматрона, позволившая запускать плазматрон на рабочих углах между головками без изменения их взаимного расположения.

Большая мощность плазматрона и высокая стабильность плазменных струй позволили анализировать не только растворы, но и порошковые пробы. Введение растворов осуществляется пневматическим распылителем концентрического типа. Вводимый аэрозоль узким мелкодисперсным потоком идет по плазменному коридору, образованному струями плазмы плазматрона. Порошковые пробы подаются в плазму в виде аэрозольной взвеси с помощью дозатора [22, 23], в котором взмучивание пробы происходит высокочастотным искровым разрядом с коаксиальными электродами разрядника.

Благодаря удачной геометрии плазмы и высокой температуре, в аналитической зоне – 8000 К [24] – применение плазматрона для анализа геологических объектов позволило получить пределы обнаружения для широкого круга элементов на уровне 0,0001 – 0,000001 масс. долей %, и было показано ослабление влияния валового состава проб на результаты анализа [25].

Комбинация двухструйного плазматрона со спектрографом (обратная линейная дисперсия – 2 А/мм) и регистрацией на ФЭК с линейными ПЗС представляет эмиссионный спектрометр, который может составить конкуренцию лидерам аналитического приборостроения – спектрометрам с ИСП-плазмой.

Заключение

В работе представлен обзор конструкций дуговых плазматронов: это плазматроны с газовой стабилизацией, плазматроны со стабилизацией стенкой, факельные плазматроны и плазматроны с отдельными электродными камерами.

Показано, что снижения пределов обнаружения при спектральном анализе сложных объектов можно добиться, сочетая высокую температуру плазмы в аналитической зоне и большое время пребывания в ней определяемых элементов. Рекордные пределы обнаружения в ИСП-плазматроне получены благодаря удачной плазме в виде

трубы с относительно холодной центральной зоной, в которую вводится анализируемая проба.

Среди дуговых плазматронов наилучшую геометрию плазмы имеет двухструйный плазматрон. В двухструйном дуговом плазматроне проба вводится в плазменный коридор между горячими струями плазмы в место их слияния. Независимость режима работы плазматрона и параметров плазмы от вводимой пробы, позволяет применять плазматрон как для анализа растворов, так и для прямого анализа порошковых проб с наилучшими среди дуговых плазматронов пределами обнаружения и демонстрирует ослабление влияния валового состава проб на результаты анализа. Практически нерасходуемые электроды плазматрона делают его еще более привлекательным для массового спектрального анализа.

Литература

1. Заякина, С.Б. Экспериментальное исследование безэлектродного ВЧ-емкостного разряда в аргоне при атмосферном давлении и оценка его аналитических возможностей / С.Б. Заякина, И.Р. Шелпакова, И.Г. Юделевиц // СО АН СССР, Новосибирск, 1976, №1292-76. Деп. ВИНТИ 1977.
2. Пупышев, А.А. Некоторые аналитические особенности высокочастотного факельного разряда в спектральном анализе растворов / А.А. Пупышев, В.Н. Музгин // Журн. аналит. химии. – 1973. – Т.28. с.890.
3. Greenfield, S. High pressure plasmas as spectroscopic emission source / S. Greenfield, I.L.Jones, C.T. Berry.– Analyst, 1964. – V. 89, № 1064. – P. 713-720.
4. Boumans P.W.J.M. Plasma sources for multielemental analysis of solution: capabilities, imitations and perspectives / P.W.J.M Boumans. – Microchim. Acta, 1978. – № 1. P. 399-412.
5. Margoshes and Scribner B.F. The plasma jet a Spectroscopic source. – Spectrochim. Acta, 1959. – № 14. – P. 138-145
6. Королев, В.В., Вайнштейн Э.Н. Использование плазменного генератора в качестве источника возбуждения в спектральном анализе / В.В. Королев, Э.Н. Вайнштейн // Журн. аналит. химии. – 1959. – Вып. 6. – Т.14. – С. 658-662.
7. Кварацхели, Ю.К. Применение плазменного источника для спектрального анализа шлаков / Ю.К. Кварацхели // Зав. лаб. – 1960. – Т. 26, №5, – С. 557-559.
8. Owen L.E. Stable Plasma jet for Excitation of Solution / L.E. Owen. – Appl. Spectrosc., 1961. – V. 15, № 5. – P. 150-152.
9. Chapman J.F., Dale L.S. and Whitem R.N. An Improved Plasma jet System for Spectrochemical Analysis.- Analyst., 1973. – V. 98. – P. 529-534.
10. Rippetoe W.F. and Vickers T.J. Rotating Arc Plasma Jet for Emission Spectrometry. – Anal. Chem., 1975. – V. 17. – P. 2082.
11. Yamamoto M. Stable Plasma Jet for Spectroscopic Source. – Jap. J. Appl. Phys., 1962. – V. 1, №4. P. 235-236.
12. Карих, Ф.Г. Разработка плазматрона – спектроскопического источника света / Ф.Г. Карих, Г.А. Кобцов, Р.И. Конавко и др. // Исследование электрической дуги и плазматрона. – Фрунзе : Илим, 1968. – с. 39-47.
13. Kranz, E. Aufbau und Eigenschaften eines verunreinigungsfreien Plasmabrenners für spektroskopische Zwecke in Emissionsspektroskopie / E. Kranz; Akademie-Verlag. – Berlin, 1964. – P. 160-172.
14. Rippetoe, W.F. Characterization of the Plume of a Direct Current Plasma Arc for Emission Spectrometric Analysis / W.F. Rippetoe, E.R. Johnson, T.J. Vickers. – Anal. Chem., 1975. – V. 47. – P. 436.

15. Королев, В.В. Дуговой плазматрон и его применение в эмиссионном спектральном анализе / В.В. Королев, М.Е. Шувалова // Журн. прикладной спектроскопии. – 1979. – Т. 31, № 4. – С. 585-591.

16. Patent N 3.596.128 (USA) Excitation Source for Spectroscopic Analysis. Spectra Metrics, Incorporated., Inventor W.G. Elliott., Patented July 27, 1971.

17. Valente S. F. and schrenk W.G. The Design and Some emission Characteristics of an Economical do Arc Plasma jet excitation Source for Solution Analysis. – Appl. Spectrosc., 1970. – V.24, №2. – P. 197-205.

18. Patent N 4.009.413 (USA). Plasma jet Ovice and Method of Operating Same. Assignee: Spectra Metrics, Incorporated, Inventors W.G. Elliott., T.J. Karlinski, Patented Feb. 22, 1977.

19. Patent N 7900753 (republique Francais). Dispositif pour produire un jet de plasma. Deposant: Spectrametrics, Incorporated Karl J. Hildebrant, 12 janvier 1979.

20. Конавко, Р.И. Двухструйный плазматрон / Р.И. Конавко, В.С. Энгельшт, Д. Буранчиев и др. // Всесоюзн. конф. по генераторам низкотемпературной плазмы. – Фрунзе : Илим, 1974. С. 155-158.

21. Энгельшт, В.С. Устройство для зажигания дуг двухструйного плазматрона / В.С. Энгельшт, Р.И. Конавко, А.П. Тагильцев. – 1980; А.с. СССР, № 791194.

22. Энгельшт, В.С. Устройство для введения порошка в поток плазмы / В.С. Энгельшт, А.П. Тагильцев, А. Чылымов, Р.И. Конавко 1982. А.с. СССР № 989939.

23. Жеенбаев, Ж.Ж. Устройство для введения порошка в поток плазмы / Ж.Ж. Жеенбаев, А.П. Тагильцев, В.С. Энгельшт. А.с. СССР № 1160808.

24. Черевко, А.С. Изучение температурного поля плазменной струи двухструйного плазматрона / А.С. Черевко, В.В. Пикалов, А.П. Тагильцев и др. // Журн. прикладной спектроскопии. – 1983. – Вып. 3. – Т. 33. – С. 497-499.

25. Юделевич, И.Г. Спектральный анализ геологических проб с использованием двухструйного плазматрона / И.Г. Юделевич, А.С. Черевко, А.П. Тагильцев // Изв. СО АН СССР. Серия хим. наук. – 1981. – Вып. 2. – С. 80-86.

ARC PLASMATRONS FOR SPECTRUM ANALYSIS

А.Р. Tagiltsev¹⁾, Е.А. Tagiltseva²⁾

¹⁾ Belgorod Stat University, Studencheskaja St.,14, Belgorod, 308007, Russia

²⁾ Belgorod Stat University, Studencheskaja St.,14, Belgorod, 308007, Russia

The intention for reducing the limits of revealing in the spectrum analysis has meant the development of two directions of plasma generator: non electrode discharges and arc plasmatron. The development of the first direction led to the creation of the ICP- plasmatron, the second one – to the two jet arc plasmatron. It is shown that the main role in achieving low limits of revealing belongs to the temperature of the spectrum stimulation source and to the plasma geometry of the time when a sample is introduced into the central and comparatively cold zone surrounded by the hot plasma walls. The review of the arc plasmatron constructions is presented in the article.