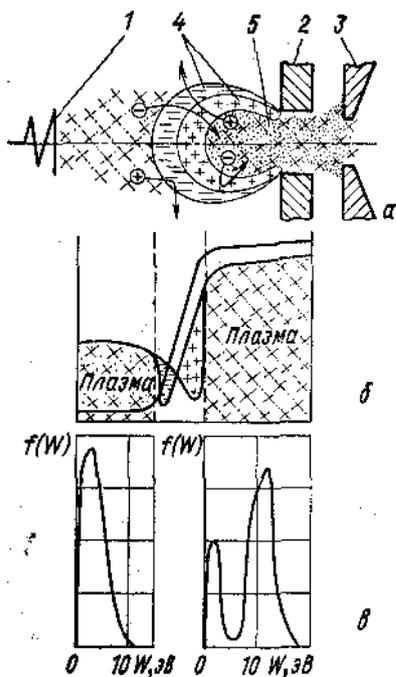


## ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ДУГОВЫХ КОНТРАГИРОВАННЫХ РАЗРЯДОВ

### 10. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА КОНТРАГИРОВАННЫХ РАЗРЯДОВ

Получение с помощью ПИЭЛ стационарных и квазистационарных электронных пучков со значительными токами ( $I > 1$  А) связано с необходимостью использования разрядных токов по меньшей мере того же порядка. Обычно такие токи обеспечивают дуговые разряды с холодным или накаливаемым катодом. Кроме того, дуговые разряды имеют наименьшее напряжение горения, что важно для сильноточных ПИЭЛ, при создании которых существенны вопросы охлаждения разрядных камер и повышения энергетической эффективности. Достоинства дуговых разрядов позволили разработать электронные источники при несамостоятельном дуговом разряде с накаливаемым катодом и при самостоятельном дуговом разряде с катодным пятном на холодном электроде. Развитие ПИЭЛ обоих типов привело к целесообразности контрагирования разряда, так что в настоящее время обычно применяются источники с контрагированным дуговым разрядом. В обоих случаях причиной контрагирования является стремление повысить плотность плазмы в области токоотбора и тем самым увеличить эффективность извлечения электронов, поскольку, отбор заряженных частиц из однородного положительного столба весьма не эффективен. Кроме этого, контрагирование разряда позволяет уменьшить размер эмиссионного отверстия и в результате создать необходимый перепад давления при малом расходе газа. При использовании дуги с катодным пятном контрагирование разряда позволяет также устранить или значительно уменьшить зависимость параметров плазмы в области извлечения от положения катодного пятна.



**Рис. 20.** Структура контрагированного разряда (а, б) и энергетическое распределение электронов в разряде (в):

1 — катод; 2 — промежуточный анод; 3 — главный анод; 4 — двойной слой; 5 — плазменный сгусток

В дуговых электронных источниках наиболее часто используется контрагирование отверстием в промежуточном электроде. Электродная схема и структура такого разряда поясняются рис. 20. Сначала зажигается разряд между катодом 1 и промежуточным анодом 2. Электроны из прианодной плазмы вспомогательного разряда через канал в аноде 2 попадают в пространство между промежуточным и главным анодами и ускоряются в нем. В режиме, при котором горит лишь вспомогательный разряд, главный анод 3 по существу является зондом или извлекающим электродом. Ионы, образующиеся в результате ионизации электронами газа в промежутке между анодами, компенсируют электронный заряд и, поступая в плазму вспомогательного разряда, вызывают увеличение электронного

тока в этом промежутке за счет ионно-электронной эмиссии плазмы. Повышение давления, напряжения между анодами или тока вспомогательного разряда приводит к увеличению ионного потока и эффективности отбора электронов из вспомогательного разряда. При достижении критических условий происходит пробой слоя пространственного заряда между плазмой вспомогательного разряда и главным анодом и перебрасывание разряда на последний.

Электронный ток в контрагирующем канале близок к току в широкой части разряда, поскольку электрод, в котором имеется такой канал, подсоединяется к источнику напряжения через ограничительное сопротивление. Однако условия протекания тока в контрагирующем канале отличаются от условий в широкой части разряда. Особенности разрядов с сужением разрядного канала рассмотрены Г. Г. Тимофеевой. Плотность тока в контрагирующем канале может на 1-3 порядка превышать плотность тока в катодной части разряда. В таком канале ионный ток меньше тока в катодной части. Это вызвано повышенными потерями ионов вследствие их радиальной диффузии на стенки канала. Кроме того, уменьшение ионного тока вызывается повышенным разрежением газа в канале, обусловленным суммарным действием переноса вещества ионами, передачи импульса от электронов молекулам и сопротивлением сужения протеканию газа.

Уменьшение ионного потока, выходящего из канала в катодную часть разряда, приводит к появлению на входе в канал области с нескомпенсированным отрицательным зарядом и значительной напряженностью электрического поля. Ускоренные в этой области электроны интенсивно ионизируют газ и непосредственно за ней создается избыточный положительный заряд. Образующиеся при этом распределения зарядов и потенциала проведены на рис. 20, б. Вблизи сужения возникает двойной электрический слой, который повышает напряжение горения контрагированного разряда, и позволяет пройти значительной части тока через узкий канал. Длина слоя составляет несколько дебаевских длин. Слой имеет полусферическую форму и поэтому фокусирует электроны, поступающие в него с относительно большой поверхности плазмы. Напряженность поля с обеих сторон слоя обычно равна нулю. В этом случае, если допустить, что входящие в слой электроны и ионы обладают начальными скоростями, равными нулю, то отношение плотностей электронного и ионного токов в двойном слое можно определить из решения уравнения Пуассона, впервые полученного Ленгмюром. Уточнение этого решения введением в уравнение Пуассона члена, учитывающего проникновение в слой электронов из анодной плазмы, дает

$$j_e / j_i = (M / m)^{1/2} [1 + (ekT_{e1}n_{e1}) / (j_e \sqrt{2emU_{cl}})]^{-1}, \quad (36)$$

где  $U_{cl}$  — падение потенциала в двойном слое;  $n_{e1}$  и  $T_{e1}$  — концентрация и температура электронов в плазме с анодной стороны слоя.

Падение потенциала в двойном слое связано с параметрами плазмы соотношением [61]

$$U_{cl} = (k/e) \{T_{e2} - T_{e1} + [(T_{e1} + T_{e2})/2] \ln(n_{e2}/n_{e1})\}, \quad (37)$$

где  $n_{e2}$  и  $T_{e2}$  — концентрация и температура электронов в плазме с катодной стороны слоя. Обычно  $U_{cl} = 20 \div 50$  В.

Ускоренные в слое электроны обладают большой ионизирующей способностью, поэтому с анодной стороны слоя возникает ярко светящийся плазменный сгусток с повышенной концентрацией и температурой заряженных частиц. Электроны в сгустке состоят из двух групп (см. рис. 20, в), одна из которых образована быстрыми электронами, прошедшими двойной слой, не испытывая неупругих взаимодействий с атомами, а вторая — медленными электронами, появившимися в результате ионизации атомов.

При малом расстоянии между анодами плотность тока в плоскости главного анода оказывается близкой к плотности в контрагирующем канале и может достигать  $10^4$  А/см<sup>2</sup>. Если в главном аноде имеется отверстие, соосное с контрагирующим каналом, то через это отверстие можно извлечь в вакуум электронный ток, составляющий существенную часть от тока разряда.

Максимальный устойчивый ток контрагированного разряда ограничивается разрежением газа в контрагирующем канале, возрастающим с увеличением тока. Это возрастание разрежения обусловлено в основном повышением электронного давления

$$\Delta p = j \sqrt{2mU_{\text{сл}}/e}, \quad (38)$$

где  $j$ — плотность электронного тока в канале.

Уменьшение плотности газа вызывает увеличение падения напряжения  $U_{\text{сл}}$  в двойном слое, что в свою очередь в соответствии с (38) ведет к дополнительному разрежению. Кроме того, при значительном росте  $U_{\text{сл}}$  сечение ионизации газа электронами, прошедшими слой, начинает уменьшаться с увеличением энергии электронов, что также вызывает падение интенсивности ионизации газа и дополнительное возрастание  $U_{\text{сл}}$ . При токе выше некоторого критического значения  $I_{\text{кр}}$  процессы разрежения газа в контрагирующем канале и роста напряжения в двойном электрическом слое на входе в канал нарушают условия устойчивого горения разряда [64].

Максимальный устойчивый ток контрагированного сужением разряда

$$I_{\text{кр}} = ap_0S, \quad (39)$$

где  $S = \pi d_k^2/4$ — площадь сечения контрагирующего канала или отверстия;  $p_0$ — давление в контрагирующем канале или отверстии;  $a$ — коэффициент, зависящий от вида газа. Для паров ртути  $a = 10^4$  А/(см<sup>2</sup>·мм рт. ст.).

Поскольку ПИЭЛ с контрагированным разрядом обычно работают при постоянном напуске газа  $Q$ , давление в контрагирующем канале зависит от сопротивлений, которые оказываются протеканию газа каналом и эмиссионным отверстием в главном аноде.

При использовании (39) с учетом обычно выполняемого условия  $p \ll p_1$ , где  $p$ — давление в вакуумной камере за отверстием в главном аноде, а  $p_1$ — давление в широкой части разряда между катодом и промежуточным анодом, получаем

$$I_{\text{кр}} \approx a \sqrt{2\pi M/kTQ} [(1/2) + (1/K)^2], \quad (40)$$

где  $K = d_a/d_k$ ,  $d_a$ ,  $d_k$ — диаметры отверстий в главном и промежуточном анодах.

Из (40) следует, что максимальный устойчивый ток разряда, контрагированного отверстием в промежуточном электроде, не зависит от абсолютных размеров отверстий в анодах и определяется их отношением, а также расходом и видом газа.

Для ПИЭЛ тип газа не имеет принципиального значения, поэтому при использовании контрагированного разряда для получения электронных пучков целесообразно применять тяжелые газы. Это позволяет при заданном токе увеличить отношение диаметров отверстий по сравнению с его значениями, используемыми в протонных ионных источниках, и тем самым повысить в ПИЭЛ эффективность извлечения электронов из разряда.

Г. Г. Тимофеева показала, что после достижения критического тока  $I_{\text{кр}}$ , превышение которого нарушает устойчивое токопрохождение в сужении, дальнейший его рост вновь приводит при определенных условиях к переходу в устойчивый режим. Устойчивое протекание больших токов объясняется сжатием столба в сужении собственным магнитным полем. При возникновении пинч-эффекта шнур дуги занимает лишь часть сужения и с разрежением газа в области протекания тока перемещается в соседние области.

## 11. ДУОПЛАЗМАТРОНЫ С НАКАЛЕННЫМ КАТОДОМ.

ПИЭЛ с накаленным катодом обладают определенными преимуществами перед вакуумными пушками. Основные из них состоят в следующем:

1. Использование эмиссионного канала малого диаметра позволяет защитить термокатод от бомбардировки ионами, поступающими из ускоряющего промежутка.
2. Отбор электронов с плазменной поверхности устраняет зависимость электронно-оптических свойств источника от степени эрозии термокатода.
3. Уменьшение обратной ионной бомбардировки катода позволяет использовать ПИЭЛ при более высоких давлениях в ускоряющем промежутке.

4. Возможность регулировки тока разряда вплоть до его погасания открывает эффективный путь управления током пучка ПИЭЛ, которое затруднено в мощных вакуумных пушках с термокатодом.

5. В результате контрагирования разряда плотность тока, отбираемого из плазмы, может значительно превышать плотность эмиссионного тока термокатада.

Из плазменных источников заряженных частиц с термокатодом наиболее широкое распространение в качестве ионных источников получили дуоплазматроны. В дуоплазматронах производится двойное контрагирование разряда: отверстием в промежуточном электроде и неоднородным магнитным полем. При изменении полярности ускоряющего напряжения дуоплазматроны могут обеспечивать электронные пучки.

Схема дуоплазматрона приведена на рис. 21. Между накалимым катодом 1 и промежуточным анодом 2 при давлении газа порядка  $10^{-2}$  мм рт. ст. зажигается несамостоятельный разряд. В определенных условиях разряд перебрасывается через отверстие в промежуточном аноде на главный анод 3, положительный относительно промежуточного анода. При этом образуется контрагированный дуговой разряд. Перебрасывание разряда на главный анод происходит при пробое слоя отрицательного заряда между плазмой вспомогательного разряда и главным анодом. Контрагирование дуги в дуоплазматроне усиливается сильным неоднородным магнитным полем, которое создается между главным и промежуточным анодами, выполняющими роль полюсных наконечников магнитной цепи.

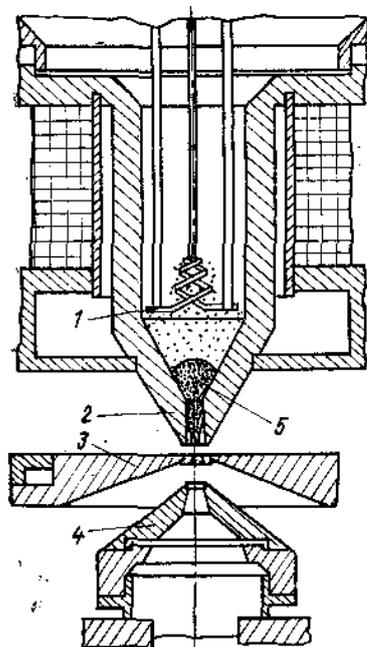


Рис. 21. Дуоплазматрон [67]:

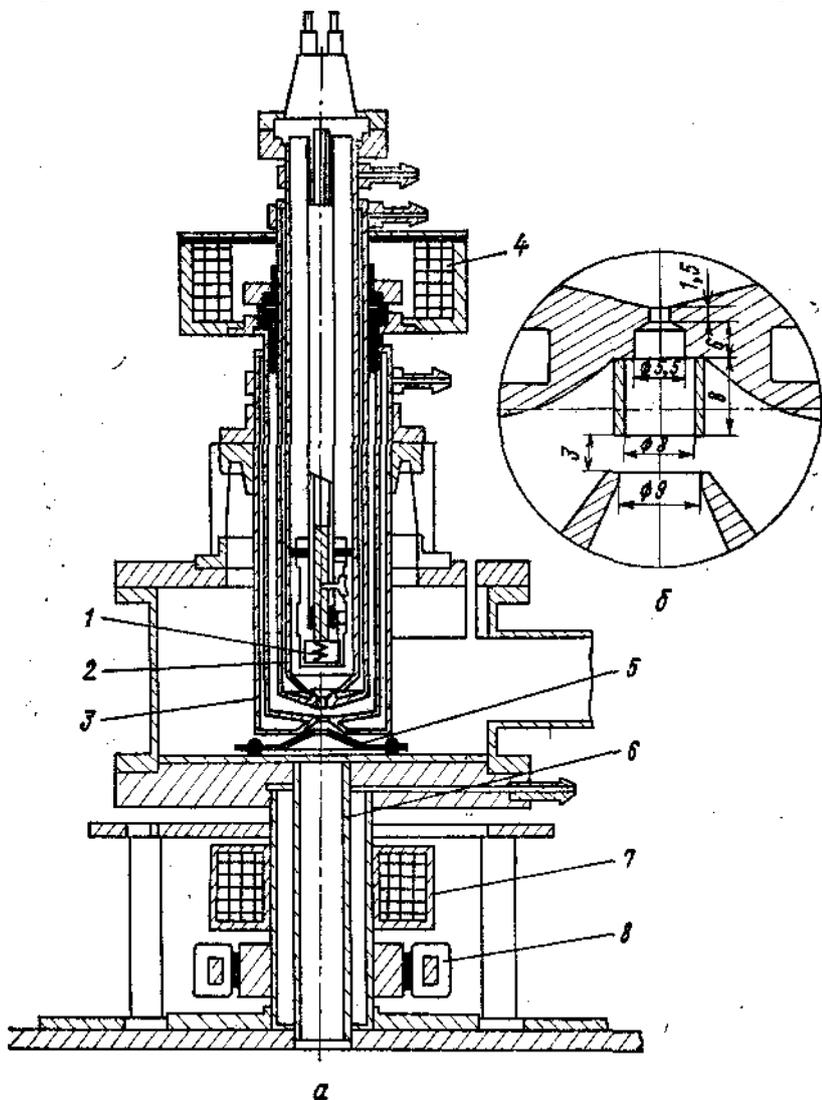
- 1 — катод; 2 — промежуточный анод;
- 3 — главный анод; 4 — извлекающий электрод;
- 5 — плазменный сгусток

Разряд в дуоплазматроне имеет типичную для контрагированного разряда структуру. С катодной стороны канала в контрагирующем электроде (промежуточном аноде) возникает близкий к сферическому плазменный сгусток, который окружен двойным электрическим слоем, ускоряющим электроны и направляющим их в контрагирующий канал. Степень ионизации газа в промежутке между анодами дуоплазматрона может приближаться к 100%. Для снижения потока извлекаемых из разряда отрицательных ионов, распад которых увеличивает количество нейтралов, выходящих из разряда, предлагается использовать в качестве рабочего газа аргон и другие инертные газы. Извлечение электронов производится через отверстие в главном аноде с помощью извлекающего электрода 4.

Несколько мощных ПИЭЛ на основе дуоплазматронов непрерывного действия с накалимым катодом разработано во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина. Одна из конструкций показана на рис. 22, а. ПИЭЛ содержит накалимый вольфрамовый катод 1, промежуточный анод 2 и главный анод 3. Рабочий газ — аргон подается в полость промежуточного анода. Расход газа не превышает  $10 \text{ см}^3/\text{ч}$ . Давление в

разрядной камере составляет  $4 \cdot 10^{-2}—5 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст. Минимальное давление ограничивается возникновением обрывов дуги, максимальное — пробоями ускоряющего промежутка. Аноды разрядной камеры изготовлены из магнитной стали и служат полюсами электромагнита 4. При изменении тока разряда от 0,1 до 12 А напряжение горения дуги составляет 50—150 В. Электроны извлекаются из разряда через эмиссионное отверстие диаметром 0,8—1,5 мм и формируются в пучок в промежутке между главным анодом и извлекающим электродом 5. ПИЭЛ устойчиво работает при токах пучка до 1,5 А и при ускоряющем напряжении до 30 кВ.

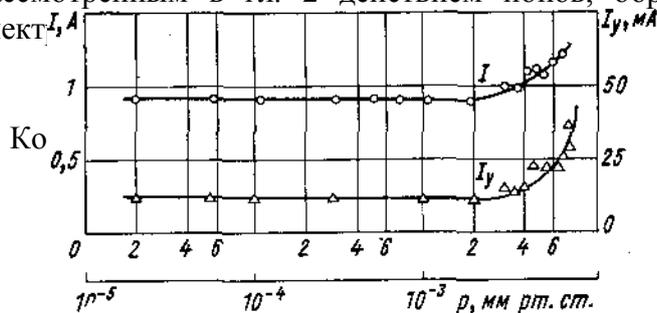
Вольт-амперные характеристики ПИЭЛ приведены на рис.23. Слабая зависимость тока от напряжения при высоких значениях последнего, типичная для плазменных источников заряженных частиц, объясняется стабилизацией поверхности токоотбора из-за трудности



**Рис. 22.** ПИЭЛ на основе дуоплазматрона с накаливаемым катодом (а):

1 — катод; 2 — промежуточный анод; 3 — главный анод; 4 — электромагнит; 5 — извлекающий электрод; 6 — трубка дрейфа; 7 — фокусирующая линза; 8 — отклоняющая линза; 6 — система извлечения ПИЭЛ мощностью 100 кВт

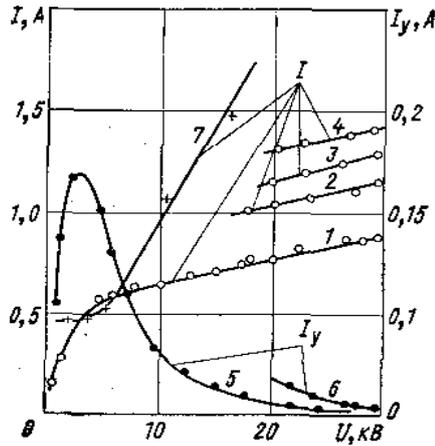
проникновения извлекающего поля через малое эмиссионное отверстие. Увеличение эмиссионного отверстия ограничивается допустимым с точки зрения возникновения пробоев давлением в ускоряющем промежутке, которое не должно превышать  $10^{-3}$  мм рт. ст. На рис. 24 даны газовые характеристики ПИЭЛ. Наблюдаемый при повышенных давлениях в вакуумной системе рост тока пучка при постоянном разрядном токе обусловлен рассмотренным в гл. 2 действием ионов, образующихся в результате ионизации газа элект.



**Рис. 23.** Вольт-амперные характеристики ПИЭЛ [20]:

$I$  — ток пучка;  $I_y$  — ток утечки;  $I-6$  — поверхности ПИЭЛ мощностью 50 кВт; 7 — 100 кВт; 1, 5 —  $I_n=1,5$  А; 2 —  $I_n=2$  А; 3 —

**Рис. 24.** Зависимость токов от давления [20]



вызывают модуляцию электронного пучка и расширение энергетического спектра электронов. Частота и амплитуда колебаний сложным образом зависят от параметров разряда. Основными являются колебания с частотой 0,8—1,8 МГц. Интенсивность колебаний возрастает с увеличением напряженности магнитного поля и давления аргона в разрядной камере и уменьшается с повышением давления в технологической камере до  $8 \cdot 10^{-4}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст. При давлении в разряде выше  $10^{-1}$  мм рт. ст. спектр колебаний тока пучка становится сплошным с диапазоном частот от десятков килогерц до 2 МГц.

Усовершенствование системы извлечения ПИЭЛ введением экспандера (см. рис. 22, б) позволяет повысить электрическую прочность ускоряющего промежутка, расширить диапазон давлений и увеличить мощность пучка до 100 кВт при напряжении 30 кВ. Показана возможность эффективного управления током пучка при изменении в небольших пределах магнитного поля дуоплазматрона. Питание катушки электромагнита осуществляется током разряда. Проведенное в ВЭИ детальное сравнение характеристик мощных ПИЭЛ на основе дуоплазматронов с накаливаемым катодом и технологических вакуумных пушек с термокатодом показывает, что надежность ПИЭЛ и широкие возможности управления током пучка делают оправданным и перспективным разработку и использование ПИЭЛ этого типа.

В работе описан ПИЭЛ на основе дуоплазматрона с накаливаемым катодом, обеспечивающий при длительности импульсов 0,5—10 мс и частоте 0,2—10 Гц электронный пучок с током до 17 А. Схема ПИЭЛ и распределение магнитного поля по оси источника приведены на рис. 25. В разрядной камере кроме обычных для дуоплазматрона катода 1, промежуточного анода 3 и главного анода 4, используется отражатель 5, электрически соединенный с катодом. Отражателем 5 и катушкой 2 обеспечиваются условия для осцилляции электронов в неоднородном магнитном поле, что позволяет повысить степень ионизации газа в разряде и понизить требуемое давление газа. В источнике применяли  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ . Давление газа в разрядной камере составляет  $10^{-3}$ — $8 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., что на полтора порядка ниже рабочего давления, необходимого для обычных дуоплазматронов. Требуемый расход газа определяется соотношением  $Q=10^{-4} I_p \text{ см}^3/\text{с}$ , где  $I_p$ — разрядный ток, А.

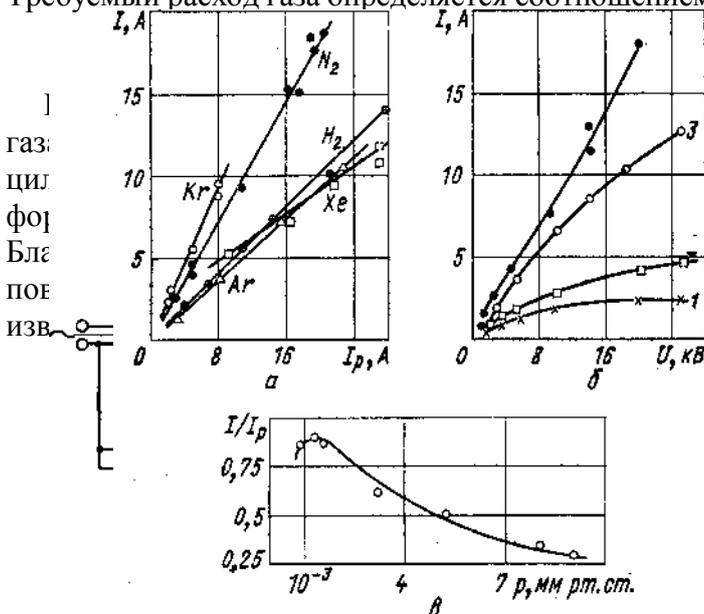


Рис. 25. Схема ПИЭЛ на основе дуоплазматрона с осцилляцией электронов :

1— катод; 2— катушка; 3— промежуточный анод; 4— главный анод; 5— отражатель; 6— экспандер; 7— извлекающий электрод

Рис. 26. Характеристики ПИЭЛ:

а— эмиссионные,  $U=20$  кВ; б— вольт-амперные, газ—  $N_2$ , в— зависимость эффективности извлечения от давления, газ—  $Xe$ ,  $I_p=16$  А,  $U=20$  кВ

На рис. 26 приведены характеристики ПИЭЛ, полученные при условии, когда электронный ток слабо зависит от магнитного поля в разрядной камере. Эмиссионные и вольт-амперные характеристики качественно подобны ранее обсуждавшимся характеристикам других ПИЭЛ. Зависимость эффективности извлечения электронов от давления в разрядной камере так же, как газовая характеристика (см. рис. 19, в) ПИЭЛ с продольным извлечением электронов из отражательного разряда объясняется, по-видимому, влиянием давления на распределение плотности катодного тока в отражательном разряде. При определенных условиях извлеченный из плазмы ток превышает ток разряда ( $I=1,2I_p$ ). Это свидетельствует о том, что эмиттером электронов становится не только термокатод и соединенный с ним отражатель, но и другие электроды разрядной камеры. При этом разрядная камера по существу становится неэквипотенциальным полым катодом.

Во всех режимах работы ПИЭЛ наблюдается ВЧ-модуляция тока. При токах пучка, не превышающих 3—4 А, основная частота составляет  $10^5$ — $10^6$  Гц. Зависимость глубины

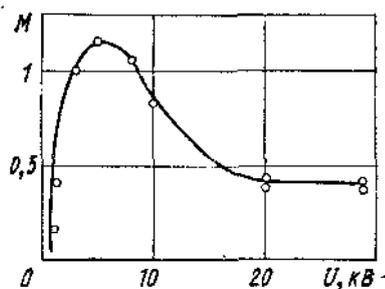


Рис. 27. Зависимость глубины модуляции пучка от ускоряющего напряжения [55], газ— Ar,  $I_p=13$  А

модуляции тока пучка от ускоряющего напряжения представлена на рис. 27.

## 12. ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ

Напряжение горения дуги в дуоплазматронах составляет 20—100 В. За счет мощности, выделяемой в разряде, температуру катода можно значительно повысить. В дуоплазматроне с термокатодом, требующим мощность нагрева 70 Вт, после зажигания дуги с током 2 А при напряжении горения 71В разогрев катода продолжается и при выключенном нагреве. Самонакаливаемый катод в ПИЭЛ реализуется в дуоплазматроне на основе самостоятельной дуги с полым катодом в магнитном поле. Конструкция ПИЭЛ приведена на рис. 28. Полый катод 1 выполнен в виде тонкостенной танталовой трубки диаметром 3,2 мм, закрытой на выходном конце выступающей из нее танталовой втулкой с осевым каналом диаметром 1,6 мм. Рабочий газ— аргон напускается в катодную полость и через втулку поступает в разрядный промежуток, в результате повышается газовая экономичность ПИЭЛ и усиливается стабильность эмиссионного термопятна на катоде по сравнению с катодом, имеющим постоянный диаметр. Промежуточный анод 2 подсоединен к главному аноду 3

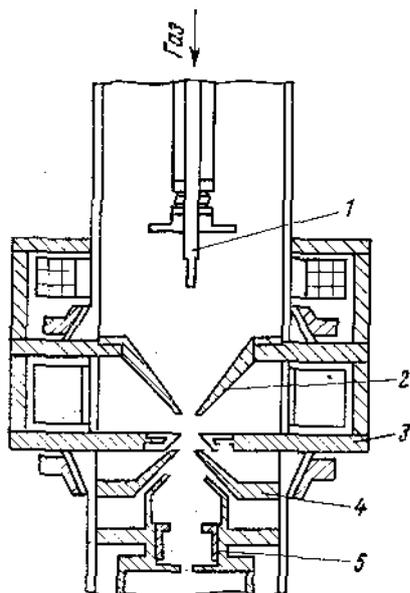
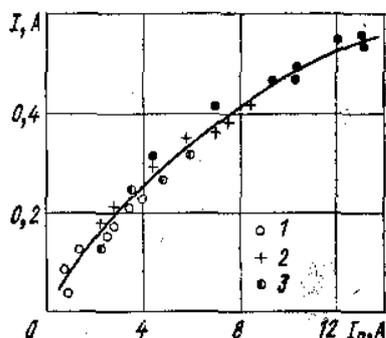


Рис. 28. Схема ПИЭЛ на основе дуоплазматрона с полым катодом [72]:

1 — полый катод; 2 — промежуточный анод; 3 — главный анод; 4 — извлекающий электрод; 5 — электростатическая линза

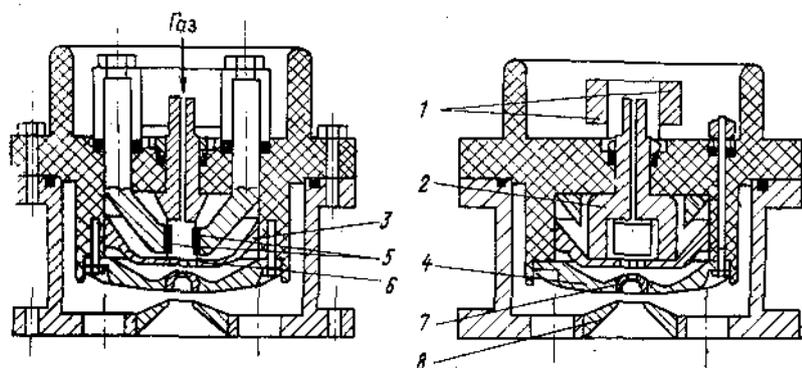
через сопротивление 50 Ом. Напряжение горения дуги составляет 30В, напряжение между анодами— 20В. Давление в пространстве распространения пучка на три порядка ниже давления в разряде. Извлекающее напряжение используется до 30 кВ, однако энергия электронов в пучке определяется потенциалом фокусирующего электрода и составляет 1—3 кэВ. Эмиссионная характеристика ПИЭЛ представлена на рис. 29. Совпадение характеристик при различном давлении свидетельствует об отсутствии влияния давления на распределение плотности плазмы в разряде, наблюдавшееся в дуоплазматроне с осцилляцией электронов (см. рис.25).



**Рис. 29.** Эмиссионные характеристики ПИЭЛ [72]:

1—  $p=11 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; 2—  $p=8 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.; 3—  $p=3 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

Тепловая инерция термокатодов делает необходимым непрерывный их нагрев независимо от режима токоотбора, поэтому в импульсных ПИЭЛ целесообразно использовать импульсные разряды с холодным катодом, потребляющие мощность только в период токоотбора. Большие токи можно получить с помощью дуговых разрядов низкого давления с катодными пятнами на холодных электродах. Чтобы применять такие разряды в ПИЭЛ, необходимо решить две основные задачи: создать условия для возбуждения дуги при низких давлениях и напряжениях и обеспечить стабильность параметров плазмы в области токоотбора при хаотическом перемещении катодных пятен. Первую задачу можно решить при использовании отражательного разряда, который, как было показано в гл. 3, относительно легко зажигается при низких давлениях и при значительных токах переходит в дугу с катодным пятном. Такой способ возбуждения дуги в импульсном ионном источнике впервые был применен М. Д. Габовичем, однако он не получил распространения из-за нестабильности пучка, извлекаемого через катодное отверстие пеннинговской электродной системы. Стабильную плазму в области токоотбора при перемещении катодных пятен можно обеспечить при использовании разряда, контрагированного отверстием в аноде пеннинговской электродной системы. Этот принцип был применен при создании ПИЭЛ различного назначения, конструкция одного из которых показана на рис. 30. Плазма генерируется в системе электродов, включающей трубку Пеннинга, образованную двумя катодами из магния 5 и прямоугольным медным анодом 2, и главный анод 4. Магнитное поле с индукцией  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл создается между катодами двумя постоянными магнитами 1, расположенными вне вакуумной камеры, с помощью магнитопроводов. Нижнюю плоскость прямоугольного анода образует крышка 3. Газ напускается через канал в верхней части анода. Расход газа составляет 20—60 см<sup>3</sup>/ч. При этом давление в пространстве дрейфа пучка равно  $3 \cdot 10^{-5}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст. Электрическое питание разрядной камеры и извлекающего промежутка осуществляется или через активный делитель напряжения от одного модулятора, обеспечивающего импульсы длительностью 10 мкс с частотой 50 Гц, или разрядная камера запитывается от второго источника, работающего на той же частоте при



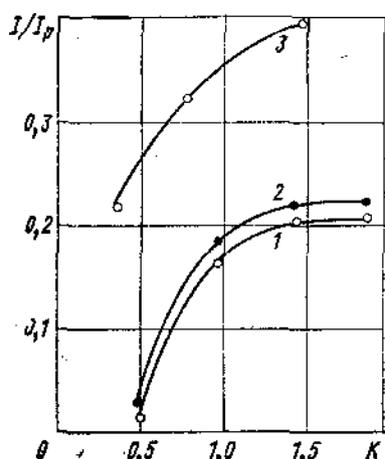
**Рис. 30.** ПИЭЛ на основе плазматрона с холодным катодом в магнитном поле [57]:

1— магниты; 2— промежуточный анод; 3— крышка; 4— главный анод; 5— катода; 6— ферромагнитная вставка; 7— экспандер; 8— извлекающий электрод

длительности импульсов 20 мкс.

При подаче напряжения в трубке Пеннинга зажигается разряд, переходящий в дугу с катодным пятном, свойства которой рассмотрены в гл. 3. Ток на аноде 2 ограничивается сопротивлением, включенным между этим электродом и главным анодом 4, что приводит к перебрасыванию разряда на главный анод. В результате возникает дуговой контрагированный разряд с холодными катодами в магнитном поле. Хаотически перемещающиеся катодные пятна и связанный с ними светящийся шнур, которые наблюдаются в дуговом отражательном разряде, существуют и в контрагированном разряде. Чтобы исключить отклонение анодной части разряда от оси отверстий в анодах, магнитное поле в области контрагирования деформировано с помощью ферромагнитной вставки б в крышке 3 промежуточного анода. Вставка устраняет поперечную составляющую магнитного поля в области контрагирования и вызывает появление составляющей, совпадающей с направлением извлечения электронов, что облегчает зажигание основного разряда и дополнительно контрагирует разряд. Структура такого разряда в области контрагирования аналогична рассмотренной выше структуре контрагированного разряда с термокатодом.

Через отверстие в главном аноде плазма проникает в экспандер 7. Вследствие фиксации анодной части разряда отверстием в промежуточном аноде и магнитным полем параметры проникающей в вакуум плазмы не зависят от положения катодных пятен. Электроны извлекаются с развитой границы плазмы с помощью электрода 8. Повышение эффективности извлечения электронов достигается увеличением отношения  $K=d_a/d_k$  диаметров отверстий в главном и промежуточном анодах. При этом снижается давление в разряде вблизи главного анода, что уменьшает предельный устойчивый ток разряда согласно (39) и (40). Влияние разгерметизации анодной части разряда на устойчивость его горения можно компенсировать в определенной степени в соответствии с (46), используя тяжелые рабочие газы. При работе с аргоном и воздухом в ПИЭЛ обеспечивается стабильный разрядный ток до 50 А при расходе газа менее 40 см<sup>3</sup>/ч и  $K=1,5$ , в то время как для работы с гелием отверстие в главном аноде необходимо было уменьшить до  $K=0,8$ . Использование водорода при  $K=0,8$  и  $Q=60$  см<sup>3</sup>/ч не позволяет получить стабильный ток  $I_p/0,5$  А, превышение которого приводит к периодическим обрывам разряда. Эффективность извлечения электронов при  $K/1$  достигает  $\alpha=30-40\%$  и существенно снижается при  $K$  ниже единицы.



**Рис. 31.** Зависимость эффективности извлечения электронов от размеров отверстий в анодах [59], газ — Ar (выходное отверстие закрыто сеткой):

1, 2 — без ферромагнитной вставки; 3 — со вставкой; 1 —  $d_a=0,8$  мм; 2 —  $d_a=1,2$  мм; 3 —  $d_a=1$  мм

Влияние ферромагнитной анодной вставки и размеров отверстий в анодах на эффективность извлечения иллюстрируется рис. 31. Как и в других ПИЭЛ с дуговым контрагированным разрядом, в источнике с холодными катодами ток пучка имеет ВЧ-составляющую (рис. 32, а, б и в), отсутствующую при извлечении ионов (см. рис. 32, е). Степень модуляции тока в зависимости от условий извлечения составляет от 5 до 100%. ВЧ-модуляцию электронного тока можно уменьшить (см. рис. 32, д), если между главным анодом и извлекающим электродом поместить сетку, электрически соединенную с главным анодом. Такой эффект, очевидно, связан с экранированием сеткой области относительно высокого давления вблизи эмиссионного отверстия от извлекающего электрического поля. Сетка

несколько уменьшает эффективность извлечения электронов, но позволяет работать при  $K \ll 1$ . На рис. 33 приведены зависимости среднего значения тока электронного пучка в импульсе от извлекающего напряжения при использовании сетки с прозрачностью 0,8 при  $K=1,5$  и расходе воздуха  $40 \text{ см}^3/\text{ч}$ . При токе пучка  $5 \text{ А}$  плотность тока в отверстии эмиссии превышает  $500 \text{ А}/\text{см}^2$ . Размах ВЧ-колебаний тока, не устраненных сеткой, показан в экспериментальных точках вертикальной чертой. Характер зависимости амплитуды

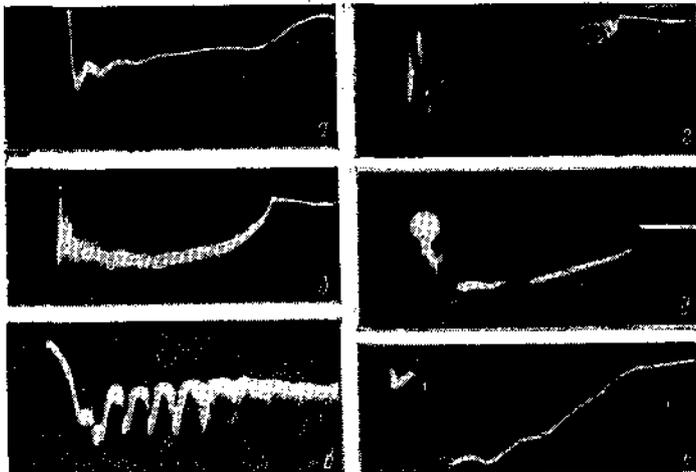


Рис. 32. Осциллограммы напряжения и тока [59] газ— воздух, ( $K=0,8$ ):

$a—U$ ;  $b—I$ ,  $Q=20 \text{ см}^3/\text{ч}$ ;  $c—I$ , длительность развертки  $2 \text{ мкс}$ ;  $d—I$ ,  $Q=40 \text{ см}^3/\text{ч}$ ;  $e—I$ , с сеткой;  $f—I_i$

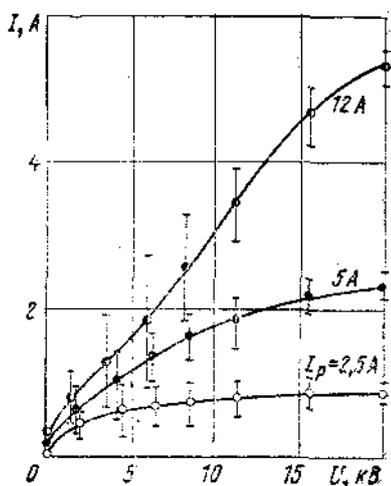


Рис. 33. Вольт-амперные характеристики ПИЭЛ

колебаний тока от напряжения согласуется с представлениями о режимах извлечения, обусловленных неустойчивостью плазменной границы токоотбора. На основе дугового разряда с холодным катодом в магнитном поле созданы ПИЭЛ с током  $15 \text{ А}$  при длительности импульсов до  $150 \text{ мкс}$  и ускоряющем напряжении до  $270 \text{ кВ}$ .

Отметим возможность использования в ПИЭЛ непрерывной самостоятельной дуги с катодным пятном на холодном пологом катоде. ПИЭЛ такого типа обеспечивает пучок с непрерывным током до  $0,5 \text{ А}$  при ускоряющем напряжении  $40 \text{ кВ}$ , расходе газа  $60 \text{ см}^3/\text{ч}$  и разрядном токе  $2,5 \text{ А}$ . Ток пучка регулируется с помощью управляющего электрода от нуля до максимального значения.

Использование самостоятельных дуговых разрядов в ПИЭЛ непрерывного действия ограничивается эрозией катодов, которая приводит к их разрушению, закорачиванию разрядного промежутка и засорению эмиссионного канала. Влияние эрозии можно ослабить, применяя катоды такой формы, при которой материал, вынесенный из одной части катода, осаждается на другой его рабочей части. Однако степень такой регенерации обычно невелика из-за попадания катодного материала на другие электроды и нерабочие части катода, а также из-за недостаточного сцепления продуктов эрозии с поверхностью катода.

Стремление к созданию ПИЭЛ с эффективно регенерирующим катодом побудило к исследованию источников с жидким ртутным катодом, регенерация которого происходит

при конденсации ртутных паров на охлаждаемой арматуре разрядной камеры и стенании ртути в катодный резервуар. Конструкция экспериментального источника показана на рис. 34. Дуга возбуждается между жидким ртутным катодом 1 и анодом 3. Для фиксации положения катодного пятна используется никелевый стержень 2 диаметром 1 мм, смачиваемый ртутью. Источник находится в продольном магнитном поле с индукцией до 0,4 Тл. Магнитное поле ограничивает столб дуги до диаметра, приблизительно равного диаметру фиксирующего электрода, и позволяет регулировать плотность плазмы. Малое расстояние между катодом и анодом, составляющее 2,5 мм, позволяет избежать положительного анодного падения в дуге, напряжение горения которой 10 В при токе 6 А. Электроны из плазмы, проникающей через анодное отверстие диаметром 0,33 мм в высоковольтную область, извлекаются с помощью электрода 5. Коллектор электронов 6 имеет потенциал извлекающего электрода, электрод 4, стабилизирующий извлечение, — потенциал анода или немного ниже. Электроды 7 и 8 с потенциалом на 20—40 В меньше, чем у извлекающего

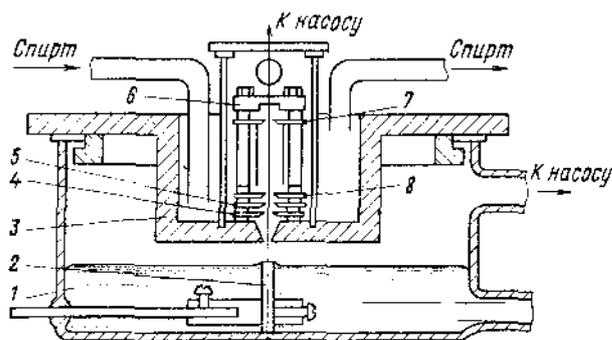


Рис. 34. Схема ПИЭЛ с ртутным катодом:

1 — катод; 2 — фиксатор; 3 — анод; 4 — стабилизирующий электрод; 5 — извлекающий электрод; 6 — коллектор; 7, 8 — ионная ловушка

электрода и коллектора, образуют ионную ловушку. Давление паров в области разряда составляет  $10^{-1}$  мм рт. ст. Чтобы обеспечить низкое давление в области извлечения, производится раздельная откачка паров из разрядной и ускоряющей камер.

Выявлено, что существует критическая плотность тока электронного пучка, извлеченного из плазмы, превышение которой приводит к ВЧ-модуляции тока вплоть до его обрывов. Измерения тока на пороге неустойчивости показали, что этот ток связан с напряжением соотношением закона «степени  $3/2$ », в которое входит расстояние между стабилизирующим и извлекающим электродами. Таким образом, интенсивные колебания тока пучка возникали в том случае, когда эмиттирующая граница плазмы оказывалась в ускоряющей промежутке.

При постоянно горящей дуге и импульсном извлекающем напряжении ( $\tau=50$  мкс,  $f=40$  Гц) до 1000 В источник обеспечивает устойчивый электронный ток до 26 мА при плотности тока в эмиссионном отверстии  $30$  А/см<sup>2</sup>. Кроме низкой эффективности ( $\alpha=0,5\%$ ;  $H=0,5$  мА/Вт) к недостаткам этого источника следует отнести использование сильного магнитного поля и раздельной откачки разрядной и ускорительной камер.

Дальнейшие исследования позволили упростить конструкцию ПИЭЛ с жидким ртутным катодом и улучшить его параметры. Появилась возможность применения в ПИЭЛ изогнутых разрядных трубок, которые позволяют изменять направление извлечения электронов при фиксированном положении ртутного катода. Вместо контрагирования столба дуги однородным магнитным полем можно использовать рассмотренное выше контрагирование отверстием в промежуточном аноде, что позволяет отказаться от массивной магнитной системы и повысить эффективность извлечения электронов. Для увеличения электронного тока, отбираемого из прианодной плазмы дуги, предложено производить извлечение через несколько отверстий в аноде разрядной камеры. При извлечении через два отверстия получен пучок с током 2,2 А при  $\alpha=44\%$  и  $H=18$  мА/Вт.

Характерной особенностью всех известных ПИЭЛ с жидким ртутным катодом является относительно низкое извлекающее напряжение 1—5 кВ, ограниченное пробоями в ускоряющей промежутке. Это свидетельствует о том, что до настоящего времени проблема обеспечения достаточного вакуума в системе извлечения ПИЭЛ с ртутным катодом при

значительных токах разряда удовлетворительно не решена.

В табл. 4 приведены основные параметры некоторых ПИЭЛ с дуговым контрагированным разрядом.

Таблица 4

Параметр	Дуоплазматрон			Плазматрон		
	с накаливаемым катодом		с полым катодом	с холодным катодом в магнитном поле		с ртутным катодом
	[20]	[55]	[72]	[59]	[44]	[78]
Режим работы	непрерывный	$\tau=0,5-10$ мс $f=0,1-10$ Гц	непрерывный	$\tau=10$ мкс $f=50$ Гц	$\tau=100$ мкс	непрерывный
Ток пучка $I$ , А	1,5	17	0,6	5,5	1	2,2
Ускоряющее напряжение $U$ , кВ	30	20—30	30	20	25	5
Расход газа $Q$ , см <sup>3</sup> /ч	10 аргон	7,2		20—60 аргон	70	
Эффективность извлечения $\alpha=I/I_p$	0,6	0,5—1,2	0,04—0,07	0,3—0,4	0,3—0,4	0,44
Энергетическая эффективность $H=I/P_{cp}$ , мА/Вт	17,3	7,8	0,8			18,3
Размер выходного канала, мм	0,8-1,5	3	—	1,5	1-1,5	2