

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Стационарный отбор электронов из плазмы происходит с неподвижной плазменной поверхности с напряженностью поля, равной нулю. При этом эмиссионная способность плазмы равна пропускной способности промежутка. Ток, протекающий в промежутке, является током насыщения, но связан с извлекающим напряжением законом «степени 3/2».

В этих условиях при повышении плотности плазмы (см. гл. 2) ток эмиссии превысит ток, ограниченный пространственным зарядом. В результате вблизи поверхности плазмы образуется область минимума потенциала, а непосредственно у плазменной поверхности поле окажется ускоряющим для ионов. Это вызовет перемещение плазменной поверхности к извлекающему электроду, возрастание перванса промежутка и пропускаемого им тока.

Если плотность плазмы

$$n_e > (8\varepsilon_0/9)\sqrt{e\pi/kT_e}(U^{3/2}/d^2), \quad (44)$$

стационарное извлечение электронов затруднено. Однако большие электронные токи (до 10^6 А) можно отбирать из плазмы в вакууме за время движения плазмы в ускоряющем промежутке.

Плотную плазму можно создать в ПИЭЛ с помощью искрового разряда, в результате взрыва электрического проводника при протекании в нем достаточно большого тока, в частности при взрывном разрушении эмиттера собственным током автоэлектронной эмиссии, при разряде по поверхности диэлектрика и при облучении мишени лучом оптического квантового генератора (ОКГ). Эти ПИЭЛ имеют много общих черт, и их можно объединить в одну группу. Исторически сначала использовался в ПИЭЛ первый способ создания плазмы. В настоящее же время наиболее изучены и получили широкое применение электронные источники с плазмой, возникающей в высоковольтном промежутке при электрическом взрыве катодных микроострий. Поэтому рассмотрим более подробно такие ПИЭЛ и остановимся на особенностях источников, использующих другие способы создания нестационарной плазмы.

Кроме ПИЭЛ с ограниченной продолжительностью токоотбора вследствие несоответствия между эмиссионной способностью плазмы и пропускной способностью промежутка рассмотрим также ПИЭЛ, в которых длительность рабочего периода ограничивается временем развития в ускоряющем промежутке неустойчивостей других типов.

18. ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМОЙ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ ВЗРЫВЕ КАТОДНЫХ ОСТРИЙ В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Образование плазмы у катода вакуумного промежутка при достаточно высоком напряжении в промежутке и поступление электронов из этой плазмы на анод представляют одну из стадий развития вакуумного пробоя. Поэтому создание и совершенствование таких ПИЭЛ тесно связано с исследованием вакуумного пробоя. Решающий вклад в рассмотрение этого явления сделан Г. А. Месяцом и Г. Н. Фурсеем

Если к вакуумному промежутку между холодными металлическими электродами приложить высокое напряжение, то напряженность поля у кончика острия катода или у поверхности естественных микровыступов плоского катода будет настолько большой, что возникает интенсивная автоэлектронная эмиссия. Перегрузка катодного выступа собственным автоэмиссионным током, переходящим в ток термоавтоэлектронной эмиссии, приводит к взрывообразному разрушению.

После взрыва катодного выступа у места взрыва появляется плазменное образование, названное катодным факелом. Степень ионизации плазмы в катодном факеле близка к 100%, непосредственно у острия концентрация частиц $n_e=10^{26}\div 10^{27} \text{ м}^{-3}$, а в области $10^{-6}\text{—}10^{-5} \text{ м}$ в среднем $n_e=10^{24}\div 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Температура плазмы составляет $T_e\approx T_i\approx(10^4\text{—}10^5) \text{ К}$. Наблюдения

распространения фронта светящейся границы плазмы показали, что катодный факел расширяется и, таким образом, приближается к аноду. Скорость расширения катодного факела слабо зависит от приложенного напряжения и составляет для Al— $3,4 \cdot 10^4$; Cu— $2,6 \cdot 10^4$; Mo— 2,0; Pb— $1,1 \cdot 10^4$ м/с

После взрыва острия и возникновения катодного факела электронный ток в промежутке возрастает на 2—3 порядка. Интенсивную эмиссию электронов из катода через фазовый переход от металла к плотной плазме называют взрывной эмиссией. Плотность тока взрывной эмиссии $j=10^8$ А/см² и значительно превышает плотность тока автоэлектронной эмиссии, которая имеет место в отсутствие плазмы. Механизм выхода электронов из катода при взрывной эмиссии предполагается близким к механизму электронной эмиссии в катодных пятнах. Выходящие из плазмы в вакуум электроны ускоряются напряжением, приложенным к промежутку, и формируются в пучок.

В работе показано, что электроны в катодном факеле обладают свойствами идеального газа, подчиняющегося статистике Максвелла— Больцмана. Плотность тока электронной эмиссии из плазмы катодного факела определяется соотношением (16). В большинстве случаев электронный ток в диоде со взрывной эмиссией связан с приложенным напряжением законом «степени 3/2», что возможно лишь в отсутствие у эмиссионной поверхности поля, ускоряющего электроны. Эмиссионная способность плазмы катодного факела обычно превышает пропускную способность промежутка между фронтом факела и анодом. Это обуславливает на границе плазма— вакуум поле, тормозящее электроны и ускоряющее ионы, а также минимум потенциала вблизи границы. Такое распределение поля наряду с первоначально запасенной в катодном факеле энергией являются причинами расширения факела. Увеличение при этом первоначально промежутка вызывает возрастание отбираемого из факела и протекающего в промежутке тока. Таким образом, в ПИЭЛ на основе взрывной эмиссии плазма, с одной стороны, обеспечивает в контакте с твердым телом интенсивную эмиссию электронов из катода, превышающую автоэлектронную эмиссию, а с другой— повышает пропускную способность диода благодаря частичному заполнению факелом межэлектродного промежутка. Максимальная длительность токоотбора ограничивается временем прохождения катодного факела до анода и во многих случаях не превышает 10^{-7} с. При значительных токах бомбардировка анода высокоэнергетичным электронным пучком с плотностью мощности на аноде до 10^6 Вт/см² приводит к появлению на аноде плазменного образования, называемого анодным факелом. Расширение анодного факела сокращает длительность электронного пучка. После замыкания плазмой межэлектродного промежутка развивается низковольтная дуга.

В отличие от рассмотренных в гл. 3 и 4 ПИЭЛ, в которых форма и площадь эмиттирующей поверхности плазмы в определенной степени не зависят от геометрических размеров катодов разрядных камер, в ПИЭЛ со взрывной эмиссией (см. рис. 1, *e*) геометрия и положение плазменной поверхности в высоковольтном промежутке определяются количеством и расположением эмиттирующих центров на металлическом катоде.

В ПИЭЛ с одноострийными и плоскими катодами большое значение приобретают микровыступы, которые существуют на поверхности макроострия и имеют радиус кривизны 0,1 мкм и менее. Благодаря усилению поля на микровыступах снижается напряжение, требуемое для взрыва острия при малом времени задержки $t_3 \ll \tau_{и}$, где $\tau_{и}$ — длительность импульса напряжения.

При напряжении $U \leq 10^5$ В и длине промежутков $d \approx 1$ мм закон «степени 3/2» для диода с одиночным острием выражается следующим соотношением

$$I \approx 30 \cdot 10^{-6} U^{3/2} \nu t / (d - \nu t)^2, \quad (45)$$

где ν и t — скорость и продолжительность расширения катодного факела.

При больших напряжениях скорость увеличения тока во времени возрастает по сравнению с (45). При этом структура пучка изменяется таким образом, что в поперечном сечении пучка наряду с центральным максимумом значительная плотность тока появляется в кольце,

концентричном по отношению к центру пучка. Такие особенности диодов с одноострийными катодами объясняются тем, что при высоких напряжениях в эмиссии электронов участвует не только кончик макроострия, но и его боковая поверхность.

При использовании двух последовательных импульсов ток пучка во время второго импульса превышает ток первого импульса. Этот эффект связывают с увеличением первеанса диода вследствие частичного заполнения промежутка плазмой, образовавшейся при первом импульсе.

Взрывная эмиссия электронов связана с расходом металла катода как при взрыве острия, так и при расширении катодного факела. Однако этот расход весьма незначителен. Например, при использовании промежутков длиной 0,3—1 мм с одноострийным молибденовым катодом, обеспечивающим в режиме взрывной эмиссии плотность тока $j=(3\div 4)10^8$ А/см², в факел поступает $(2\div 6)10^{-8}$ кг/Кл. Металл с катода уносится в зависимости от материала катода, формы острия и амплитуды напряжения. При токе до 200 А, длительности импульсов до $8\cdot 10^{-8}$ с и напряжении до $40\cdot 10^3$ В острия из вольфрама, молибдена и меди выдерживали при определенных условиях до $15\cdot 10^3$ включений без заметного нарушения стабильности работы диода.

Источники с плоскими катодами имеют свойства, близкие к свойствам ПИЭЛ с одноострийными катодами. В случае плоских катодов образование плотной плазмы, необходимой для взрывной эмиссии электронов, происходит в результате взрыва микровыступов, всегда имеющих в реальных условиях на поверхности металлов. Наряду с плоскими и одноострийными катодами в ПИЭЛ со взрывной эмиссией применяются многоострийные эмиттеры, которые обеспечивают пучки с требуемым поперечным сечением, малой расходимостью и лучшим распределением плотности тока по сечению. В качестве многоострийных катодов используются пучки тонких проволок с заостренными концами, наборы лезвий и другие системы. Для одновременного функционирования в диоде большого количества катодных факелов необходимо, чтобы время запаздывания взрыва отдельных эмиттеров t_3 было значительно меньше длительности импульса напряжения, обычно $t_3 \leq 10^{-9}$ с.

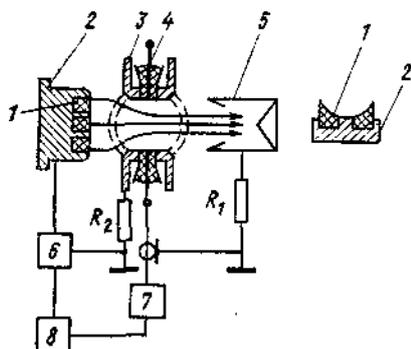


Рис. 54. Схема ПИЭЛ с плазменной линзой :

- 1— диэлектрик; 2—
- металлическая подложка; 3—
- анод; 4— искровые источники;
- 5— цилиндр Фарадея; 6— ГИН;
- 7— блок поджига; 8— блок
- задержки

Оригинальный метод улучшения характеристик ПИЭЛ на основе взрывной эмиссии реализован в работе. Суть метода состоит в предварительном создании плазмы (плазменной линзы) в отверстии ускоряющего электрода диода со взрывной эмиссией. Схема ПИЭЛ с плазменной линзой приведена на рис. 54. В источнике испытывались различные катоды: металлические, диэлектрические и комбинированные. На рис. 54 показан один из комбинированных катодов, состоящий из легкоиспаряющихся диэлектрических элементов 1, запрессованных в металлическую подложку 2. В анодном кольце диода 3 равномерно размещены искровые источники плазмы 4. Ускоряющее напряжение подается на диод с задержкой $(1\div 3) 10^{-6}$ с относительно момента поджига искровых промежутков. Несмотря на относительно большой размер выходного отверстия в ускоряющем электроде, это отверстие не оказывает дефокусирующего действия на электронный пучок, поскольку ускоряющее напряжение прикладывается между катодом и плазменной поверхностью (пунктир на рис. 54). Ускоряющий промежуток сужается плазменной линзой, что позволяет получать значительные электронные токи при относительно невысоком напряжении. Эмиттированные

плазмой ионы компенсируют пространственный заряд пучка и, бомбардируя катод, повышают его эмиссионную способность и облегчают образование катодной плазмы. При напряжении $U=60$ кВ получен электронный пучок с длительностью импульса $2 \cdot 10^{-7}$ с и током 50 кА при коэффициенте токопрохождения 96%.

ПИЭЛ на основе взрывной эмиссии, работающие при высоких напряжениях в режиме отбора больших токов, имеют существенные преимущества перед электронными источниками, использующими автоэмиссионные катоды. Эти преимущества заключаются в следующем:

1) взрывная эмиссия обеспечивает при той же геометрии электродов большие токи, поскольку вызывающее эмиссию поле положительного пространственного заряда в слое между катодом и плазменным факелом может значительно превышать поле у поверхности острия перед его взрывом;

2) ток диода со взрывной эмиссией, определяемый в основном первенсом, а не эмиссионной способностью катода, меньше зависит от микрогеометрии эмиттера и вакуума в системе. К основным недостаткам таких ПИЭЛ следует отнести:

а) малую продолжительность непрерывного отбора тока, которая ограничивается временем заполнения плазмой промежутка;

б) отсутствие возможности отдельного управления моментом возникновения эмиссии, током ПИЭЛ и напряжением, поскольку напряжение, приложенное к промежутку, служит для ускорения электронов и для возбуждения взрывной эмиссии.

Для увеличения длительности импульса тока удлиняют промежуток, тормозят катодную плазму с помощью магнитного поля и затрудняют условия образования анодной плазмы. Схема ПИЭЛ, в которой используется цилиндрический анод и магнитное поле с индукцией $8 \cdot 10^{-1}$ Тл, параллельное оси катод—анод и имеющее в ускоряющем промежутке между коническими поверхностями составляющую, поперечную к направлению распространения катодных факелов, приведена на рис. 55. При диффузии катодной плазмы поперек магнитного поля скорость движения факелов снижается до $1,5 \cdot 10^4$ м/с по сравнению со скоростью $5 \cdot 10^4$ м/с в продольном магнитном поле. В результате получается электронный пучок с током 8 кА при напряжении 250 кВ длительностью около 10^{-6} с. В неоднородном магнитном поле при расстоянии между катодом и анодом 75 мм при напряжении 300 кВ получен электронный пучок с амплитудой тока 1 кА длительностью импульса $5 \cdot 10^{-6}$ с.

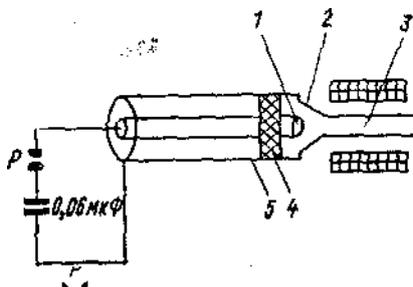


Рис. 55. ПИЭЛ с поперечным магнитным полем :

1 — катод; 2 — анод; 3 — пространство дрейфа; 4 — изолятор; 5 — коаксиальная линия; P — разрядник

Обнаружено, что при уменьшении тока с расширением катодного факела его плазма не необходимым условием остановки катодной плазмы является пропускная способность промежутка, воз эмиссионной способностью плазмы, которая с Схема ПИЭЛ, который обеспечивает реляти микросекунд, приведена на рис. 56. Многоострый катод диода имеет площадь 200 см^2 , расстояние между катодом и анодом из алюминиевой фольги толщиной 70 мкм составляет 7—26 см. При таких расстояниях и соответствующем изменении амплитуды напряжения в пределах 0,4—1,5 МВ ток электронов на коллектор составлял 5—2 кА с длительностью $4 \cdot 10^{-8}$ с. Фотографии картины свечения в промежутке показывают, что при напряжении 1 МВ и токе с острия менее 100 А плазма распространяется не более чем на 5 см. В отличие от режима коротких импульсов ($3 \cdot 10^{-8}$ с) при значительных длительностях в пучке появляются

Рис. 56. ПИЭЛ с многоострым катодом :

1 — катод; 2 — анод; 3 — коллектор; 4 — ГИН; P — разрядник

и значительном U . Очевидно, что равенства между U и U_0 не является условием равенства факела, и плотности плазмы. U_0 в несколько раз больше U .

нерегулярности, которые, как предполагается в работе, вызываются взаимодействием отдельных катодных факелов.

19. ПЛАЗМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ С НЕЗАВЕРШЕННЫМ РАЗРЯДОМ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА В ВАКУУМЕ

К перспективным ПИЭЛ со взрывной эмиссией, в которых возбуждение плотной плазмы не зависит от ускоряющего напряжения, относятся источники с незавершенным разрядом по поверхности диэлектрика в вакууме (рис. 57). Основным элементом ПИЭЛ является диск 2 из титаната бария (BaTiO_3). С одной стороны к диску прижата металлическая игла 3 или сетка, а на другую сторону нанесен контактный слой серебра 1. Разряд возникает между слоем и иглой при подаче импульсного напряжения U_p , превышающего некоторое пороговое значение. Благодаря высокой диэлектрической проницаемости BaTiO_3 ($\epsilon > 10^3$) напряжение зажигания разряда может составлять несколько сот вольт. В работе [128] показано, что при отрицательном острие разряд возникает при испарении диэлектрика под действием бомбардировки электронами, эмиттированными острием за счет автоэмиссии. Увеличение при этом тока приводит к взрыву острия. Плазма разряда создается в парах разрушенного поверхностного слоя диэлектрика.

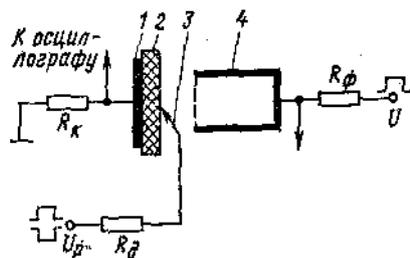


Рис. 57. ПИЭЛ с незавершенным разрядом по поверхности диэлектрика :

1 - контактный слой; 2 - диск из BaTiO_3 ; 3 - игла; 4 - ускоряющий электрод

После зажигания разряда плазма распространяется по поверхности диэлектрика со скоростью v_D , которая при толщине диэлектрика $\delta \gg v_D t_u$ выражается как $v_D = A U_p$, где $A = 4,9$ м/(В·с) при положительной полярности иглы относительно контактного слоя и $A = 21$ м/(В·с) при отрицательной полярности. Одновременно с движением плазмы по диэлектрику происходит ее распространение в промежутке перпендикулярно поверхности диэлектрика со скоростью $2 \cdot 10^4$ м/с. Расширяющаяся плазма является эффективным эмиттером электронов, которые извлекаются и ускоряются с помощью положительного относительно иглы электрода 4. Начало эмиссии с точностью до 10^{-9} с совпадает с возникновением плазмы у острия 3. Извлеченный из плазмы ток возрастает с увеличением напряжения U_p , что объясняется увеличением поверхности плазмы, эмиттирующей электроны.

Использование в ПИЭЛ вместо прижатого к диэлектрику острия мелкоструктурной сетки позволяет одновременно создать большое количество эмигрирующих центров за счет разрядов по поверхности диэлектрика в точках касания его сеткой и разрядов между сеткой и диэлектриком там, где касание отсутствует. При этом шунтирование отдельных разрядов предотвращается из-за замыкания тока каждого разряда токами смещения через емкость диэлектрика. В результате независимого действия отдельных разрядов возможно образование в течение малого времени порядка 10^{-9} с большой эмиттирующей плазменной поверхности. При напряжении 50 кВ в ПИЭЛ с покрытым молибденовой сеткой катодом площадью $13,6$ см² и межэлектродным расстоянием 14 мм получен электронный ток $2 \cdot 10^3$ А.

20. ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИЕЙ ИЗ ПЛАЗМЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ С ПОМОЩЬЮ ОКГ

Образование плотной плазмы на металле возможно при его облучении светом ОКГ. Такая плазма, будучи возбужденной на катоде межэлектродного промежутка, к которому приложено высокое напряжение, проявляет свойства, подобные свойствам плазмы катодных факелов, и ее можно использовать для создания ПИЭЛ с лазерной плазмой. Их основным достоинством является независимое управление процессами возбуждения плазмы и

ускорения электронов.

Для возбуждения эмиссии электронов используется рубиновый лазер, генерирующий импульс света мощностью 15 МВт и длительностью $20 \cdot 10^{-9}$ с. При длине ускоряющего промежутка $d=10$ мм и напряжении 40 кВ амплитуда тока ускоренных электронов достигает 150 А. Длительность импульса тока при этом линейно зависит от длины промежутка и $\tau=(80-100) \cdot 10^{-9}$ с при $d=10$ мм и $\tau=20 \cdot 10^{-9}$ с при $d=3$ мм. Такая зависимость времени коммутации от длины промежутка, характерная для диодов со взрывной эмиссией, и независимость амплитуды электронного тока от интенсивности лазерного излучения позволяют заключить, что при облучении электрода сфокусированным лучом ОКТ образуется плазма, которая расширяется вглубь промежутка и обладает эмиссионной способностью, превышающей пропускную способность промежутка. Поскольку ток ПИЭЛ и ускоряющее напряжение относительно невелики, а также мала плотность тока на аноде вследствие расширения лазерного факела в относительно длинном промежутке, можно полагать, что в условиях эксперимента анодная плазма не возникает. Тогда длительность импульса тока полностью определяется расширением катодной плазмы со скоростью 10^5 м/с. При уменьшении интенсивности лазерного излучения от 10^9 до 10^8 Вт/см² длительность импульса тока ускоренных электронов увеличивается.

Изменение давления в диапазоне $10^{-6}-10^{-4}$ мм рт. ст. не влияет на характеристики ПИЭЛ. Рост давления в пределах $10^{-4}-10^{-3}$ мм рт. ст. уменьшает длительность импульсов тока электронного пучка. Дальнейшее повышение давления приводит к зажиганию в промежутке мишень—коллектор газового разряда и прекращению ускорения электронов.

21. ИСКРОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ

В искровых источниках электронов используется плазма искрового разряда, возбуждаемого между электродами в вакууме, газе низкого давления или по поверхности диэлектрика. Образование плазмы происходит в парах материала электродов, как в ПИЭЛ с острыми катодами в вакууме или в парах диэлектрика, как в ПИЭЛ со скользящим разрядом. При этом искровой промежуток по существу выполняет функцию разрядной камеры. Электроны, эмиттируемые плазмой искры, ускоряются напряжением, приложенным между искровым промежутком и ускоряющим электродом. Такой принцип действия ПИЭЛ усложняет его конструкцию и схему питания по сравнению с диодами со взрывной эмиссией, но обеспечивает плазму той же плотности, позволяет осуществить управление разрядом и, кроме того, устраняет зависимость длительности импульса ускоренного тока от времени замыкания плазмой промежутка, в котором она образуется. Однако при тех относительно больших токах, которые характерны для искровых источников, процесс высоковольтного извлечения электронов из плазмы становится нестационарным и приводит к пробоем ускоряющего промежутка. Поэтому искровые ПИЭЛ используются лишь при импульсах, длительность которых меньше времени развития соответствующей неустойчивости.

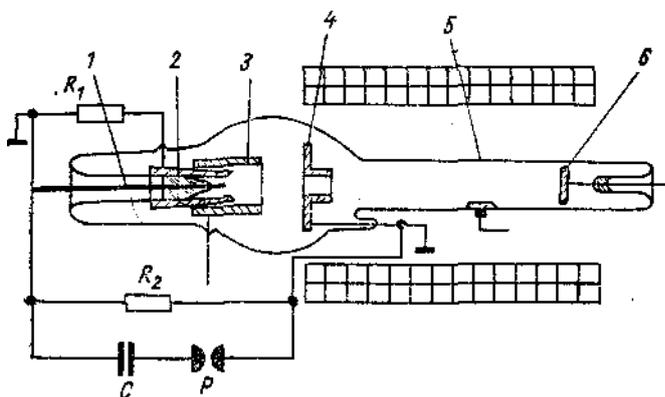


Рис. 58. ПИЭЛ с поджигом:

- 1— катод; 2— поджигающий электрод;
- 3— экспандер; 4— анод; 5— трубка дрейфа; 6— коллектор

Детальное исследование искровых источников, в которых плазма возбуждается в промежутке между холодным катодом и поджигающим электродом, проведено в работах Э. М. Рейхруделя с сотр. Конструкция одного из экспериментальных ПИЭЛ рассматриваемого типа показана на рис. 58. При разряде конденсатора C через ключ P в промежутке между катодом 1 и поджигающим электродом 2 возникает пробой. При этом развивается низковольтный разряд, ток которого, а следовательно, и плотность плазмы ограничиваются сопротивлением резистора R_1 . Эмиттируемые плазмой электроны ускоряются в промежутке между катодом 1 и ускоряющим электродом 4 .

В случае возникновения в поджигающем промежутке сильноточной дуги ($I_d/50—100A$) из нее вглубь ускоряющего промежутка распространяется плазма со скоростью $\sim 10^4$ м/с. При небольших токах ($I_d < 10A$) происходит распространение газовой волны, обусловленной десорбцией газа из электродов поджигающего промежутка и испарением материала этих электродов в дуге. При этом в ускоряющем промежутке обычно развивается разряд, который при своем формировании проходит через две основные фазы (рис. 59). В первой фазе—высоковольтной, имеющей длительность $\tau = \tau_1 + \tau_2$, в промежутке сохраняется высокое напряжение, ток разряда относительно невелик, на ускоряющий электрод поступает электронный пучок и генерируется рентгеновское излучение. Во второй фазе—плазменной—напряжение резко падает, ток увеличивается, существование ускоренного пучка прекращается, в промежутке загорается низковольтный разряд.

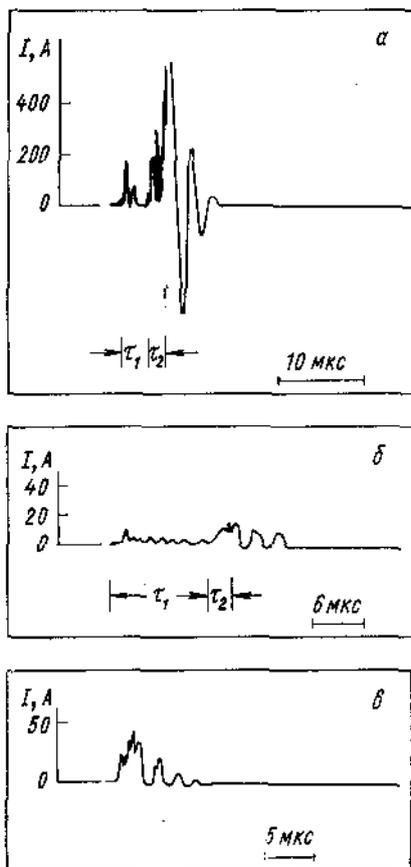


Рис. 59. Осциллограммы тока на анод (а) и коллектор (б, в)

($p = (3—5) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., $C = 0,035$ мкФ):

а— $U_0 = 30$ кВ, $R_{II} = 2$ кОм, $\tau_1 = 3,0$ мкс, $\tau_2 = 2,0$ мкс;

б— $U_0 = 30$ кВ, $R_{II} = 2$ кОм, $\tau_1 = 11,0$ мкс, $\tau_2 = 2,8$ мкс;

в— $U_0 = 60$ кВ, $R_{II} = 10$ кОм, $\tau_1 = 0,6$ мкс, $\tau_2 = 2$ мкс

Для ПИЭЛ рабочим режимом является высоковольтная фаза импульсного разряда. Эта фаза имеет две стадии: стадию предразрядных импульсов длительностью τ_1 и стадию газосфокусированного луча длительностью τ_2 . В стадии предразрядных импульсов подготавливаются условия для самостоятельного разряда при полном напряжении на промежутке. Ток при этом представляет серию последовательных импульсов. В стадии газосфокусированного луча существенное значение имеют ионы, накопившиеся в промежутке за время предразрядных импульсов. Напряжение при этом составляет около 70% полного напряжения. В промежутке проходит электронный пучок повышенной плотности, о чем можно судить, в частности, по рентгенограммам пучка за ускоряющим электродом.

Время формирования разряда в ускоряющем промежутке, в течение которого ток нарастает до максимального значения, практически равно длительности высоковольтной фазы разряда ($\tau \approx \tau_1 + \tau_2$). При давлении остаточного газа $p > 4,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и параметрах схемы $C=0,1$ мкФ, $R=1,5$ кОм и $U=30$ кВ увеличение давления приводит к сокращению длительности формирования разряда в основном за счет стадии предразрядных импульсов. После того как длительность этой стадии достигает $\tau < 10^{-7}$ с, начинается сокращение стадии газосфокусированного луча. При $p=10^{-2}$ мм рт. ст. длительность высоковольтной фазы разряда не превышает $\tau_1 + \tau_2 \approx 10^{-7}$ с. При давлении $p=4 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ мм рт. ст. и $R=45$ кОм длительность первой стадии составляет $\tau=(1-2)10^{-4}$ с. С помощью тренировки катода это время можно было довести до нескольких миллисекунд. Увеличение тока пучка и сокращение длительности высоковольтной фазы разряда происходит при уменьшении сопротивления резистора R_{II} в цепи поджигающего электрода. Последнее вызывает повышение плотности плазмы в искре и усиление газоотделения электродов и испарения их материала.

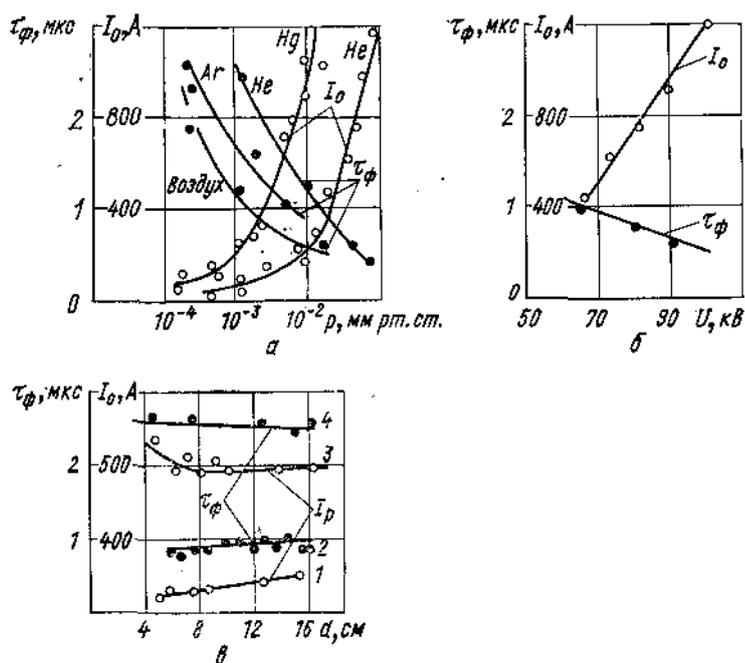


Рис. 60. Зависимости времени формирования разряда и амплитуды тока от давления (а), ускоряющего напряжения (б) и длины промежутка (в):

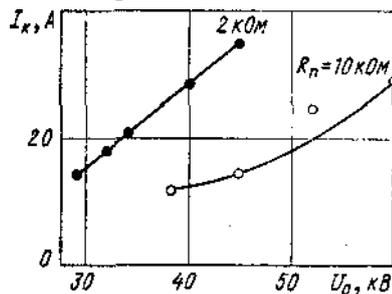
- а — $U_0=70$ кВ;
- б — $p=2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., $d=6$ см;
- в — $U_0=85$ кВ; 1—4 — $p=10^{-4}$ мм рт. ст.; 2, 3 — $p=4,4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Зависимости времени формирования разряда τ_ϕ и амплитуды тока I_0 от давления различных газов, амплитуды ускоряющего напряжения и длины промежутка даны на рис. 60. Ток пучка возрастает, а длительность его существования уменьшается с повышением давления (см. рис. 60, а), увеличением массы (сечения ионизации) атомов газа (см. рис. 60, а), усилением газоотделения из искрового промежутка, т. е. во всех случаях увеличения скорости нарастания концентрации плазмы, создаваемой электронным пучком, и плотности положительного заряда в ускоряющем промежутке. Независимость тока от длины ускоряющего промежутка (см. рис. 60, в) и получение токов, намного превышающих значения, соответствующие первеансу этого промежутка, свидетельствуют о том, что при формировании высоковольтного разряда напряжение оказывается приложенным в области, протяженность которой меньше длины ускоряющего промежутка. Это можно объяснить нейтрализацией отрицательного пространственного заряда в значительной части промежутка и приближением эмиттирующей поверхности катодной плазмы к ускоряющему электроду.

Осциллограммы тока на анод и коллектор ПИЭЛ (см. рис. 58) показаны на рис. 59. На рис. 61 дана зависимость усредненной по многим импульсам амплитуды первого всплеска тока на коллектор от амплитуды напряжения в стадии предразрядных импульсов. Ток подчиняется закону «степени 3/2», при этом первеанс ПИЭЛ составляет: $P=3,14 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2} при $R_{II}=2$ кОм

Рис. 61. Зависимость тока на коллектор от напряжения при $C=0,035$ мкФ

и $P=1,63 \cdot 10^{-6}$ А/В^{3/2} при $R_{\Pi}=10$ кОм. Экспериментальные значения первеанса на порядок превышают величины, рассчитанные при допущении, что эмиттирующая плазма полностью заполняет формирующий цилиндр, и более чем на два порядка величины, полученные при допущении, что эмиттирующая поверхность ограничена кольцевой областью между катодом и поджигающим электродом.



Магнитное поле оказывает существенное влияние на токопрохождение в ПИЭЛ и развитие разряда в ускоряющем промежутке. При этом основное значение приобретает поле в области катода. В отсутствие поля развитие разряда ограничивается стадией предразрядных импульсов. Увеличение магнитного поля приводит к возникновению стадии газосфокусированного луча, значительному улучшению токопрохождения через отверстие в ускоряющем электроде (до 95%) и развитию низковольтной фазы разряда.

ПИЭЛ обеспечивает значительные токи (до 220 А) при полном ускоряющем напряжении лишь непродолжительное время ($\sim 2 \cdot 10^{-7}$ с). Уменьшение начального давления, тщательное обезгаживание электродов и использование больших сопротивлений в цепи поджигающего промежутка приводит к затягиванию стадии предразрядных импульсов и сохранению напряжения в течение длительного времени вплоть до нескольких миллисекунд, однако при этом импульсные электронные токи оказываются малыми и не превосходят нескольких ампер.

Для получения значительных токов большой длительности предложено увеличить эмигрирующую плазменную поверхность посредством одновременного использования большого числа поджигающих промежутков. Схема ПИЭЛ с мультикатодом, включающим одиннадцать поджигающих промежутков, показана на рис. 62. Мультикатод образован собственно катодом в виде танталового диска с одиннадцатью отверстиями диаметром 1,6 мм и молибденовыми поджигающими электродами диаметром 0,8 мм, расположенными по оси катодных отверстий. Поджигающие электроды включаются в цепь через отдельные сопротивления R_{Π} , равные 2 кОм. Давление в ПИЭЛ составляет $5 \cdot 10^{-6}$ — $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

При срабатывании разрядника P катод ПИЭЛ оказывается под высоким отрицательным потенциалом по отношению к ускоряющему и поджигающему электродам. При этом происходит последовательный пробой всех поджигающих промежутков. Максимальный разброс моментов пробоя поджигающих промежутков составляет $1,7 \cdot 10^{-6}$ с, однако обычно он намного меньше.

Ток в цепи поджига и ток на ускоряющий электрод в ПИЭЛ с мультикатодом пропорциональны числу включенных поджигающих промежутков. При включении всех одиннадцати промежутков и напряжении $U_0=30$ кВ амплитуда тока на стадии предразрядных импульсов составляет $I_1=15$ А при длительности этой стадии $\tau_1=2 \cdot 10^{-5}$ с и $I_1=160$ А при $\tau_1=4 \cdot 10^{-7}$ с. При работе двух поджигающих промежутков получен пучок с током $I_1=7$ А длительностью более $8 \cdot 10^{-5}$ с. Эффективность извлечения электронов из плазмы составляет 30%.

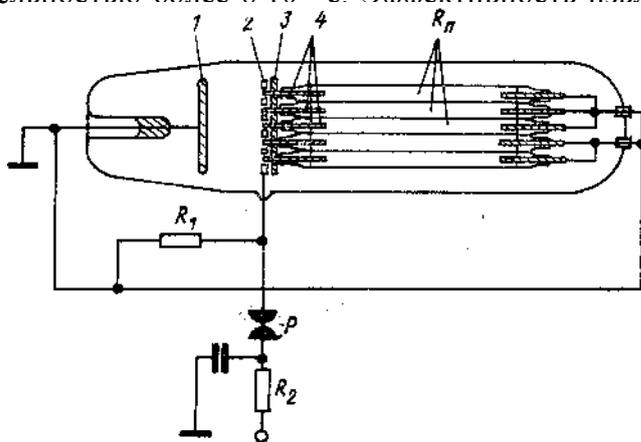


Рис. 62. ПИЭЛ с мультикатодом [137]

1— анод; 2— мультикатод; 3— керамическая решетка; 4— поджигающие электроды; P — разрядник

Способ получения сильноточных электронных пучков с помощью плазмы вакуумных искр нашел дальнейшее развитие в работах А. А. Плюто и других которые применили в ПИЭЛ искровой разряд в вакууме по поверхности диэлектрика. Схема электродов и электрического питания такого ПИЭЛ, имеющего разрядную камеру с шестью искровыми промежутками, приведена на рис. 63. Искровой разряд возбуждается по внутренней поверхности фарфоровых трубок 3 между электродами 1 и 4. В медных электродах 1 имеются каналы, в которые помещается рабочее вещество 2 (органическое стекло). Плотная плазма образуется в парах рабочего вещества, испаряющегося во время разряда, и через отверстия диаметром 4 мм в электроде 4 проникает в пространство между электродами 4 и 5. Электроны отбираются с развитой поверхности плазмы и ускоряются напряжением, приложенным между электродами 4 и 5. Выходное отверстие диаметром 35 мм в ускоряющем электроде закрыто сеткой с прозрачностью 66%. Питание разрядной камеры осуществляется от конденсаторов $C_1—C_6$ емкостью по 0,03 мкФ через резистор $R_4=3÷5$ Ом. Ускоряющее напряжение подается через $C_7=0,07$ мкФ. Сопротивление $R_2=1—5$ Ом ограничивает ток при пробоях.

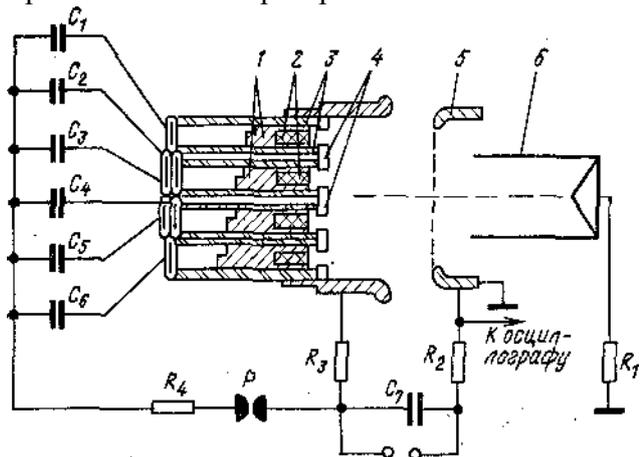


Рис. 63. ПИЭЛ с искровым разрядом по поверхности диэлектрика [6]:

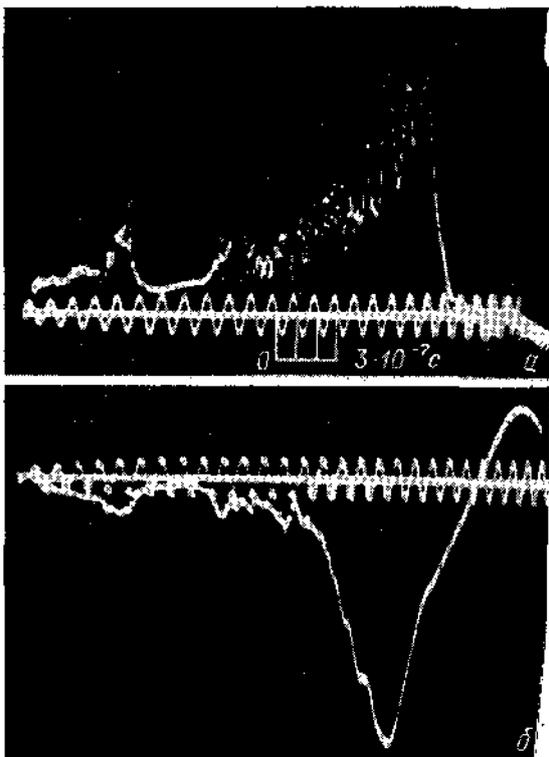
1, 4— электроды; 2— рабочее вещество; 3— фарфоровые трубки; 5— ускоряющий электрод; 6— цилиндр Фарадея

Осциллограммы полного электронного тока, извлеченного из плазмы, и тока на цилиндр Фарадея при $U=20$ кВ, длине ускоряющего промежутка $l=10$ мм и максимальном токе в искре $I_p=2$ кА даны на рис. 64. Как и в работах, здесь наблюдаются три стадии протекания тока в промежутке: в первой стадии длительностью $1,3 \cdot 10^{-6}$ с ток относительно невелик, его возрастание чередуется со спадами и паузами, несмотря на непрерывное возрастание тока искры, и сопровождается колебаниями; во второй происходит значительное ступенчатое

Рис. 64. Осциллограмма токов при $U=30$ кВ:

a— ток на цилиндр Фарадея; *b*— полный электронный ток

увеличение тока в течение $4 \cdot 10^{-7}$ с и постепенное уменьшение напряжения, ток достигает 10^3 А при средней плотности тока эмиссии $100—250$ А/см²; в третьей наступает пробой ускоряющего промежутка, напряжение падает почти до нуля и возникает двуполярная проводимость.



Зависимости извлеченного из плазмы электронного тока I_1 в первом максимуме и максимального тока I_2 во второй стадии от ускоряющего напряжения при разных токах искры, а также соответствующие характеристики тока $I_{ц1}$ и $I_{ц2}$ на цилиндр Фарадея приведены на рис. 65. Как и в ПИЭЛ на основе отбора электронов из плазмы стационарных низковольтных разрядов, увеличение электронного тока с ростом тока искры объясняется повышением плотности плазмы, эмиттирующей электроны в ускоряющий промежуток, и одновременным увеличением первеанса промежутка в результате расширения плазмы. Рост тока на цилиндр Фарадея в первой стадии с увеличением напряжения (см. рис. 65, б) при постоянном извлечении тока (см. рис. 65, а), а также уменьшение тока на цилиндр Фарадея при удлинении ускоряющего промежутка позволяют заключить, что в обоих случаях причиной перераспределения тока между цилиндром Фарадея и ускоряющим электродом является влияние на фокусировку пучка положения и формы эмиттирующей плазменной поверхности. С увеличением напряжения и укорочением ускоряющего промежутка эта поверхность приближается к разрядной камере и становится более вогнутой. Эффективность извлечения электронов в первой стадии при $I_p=4$ кА с увеличением напряжения возрастает $\alpha=10\div 45\%$.

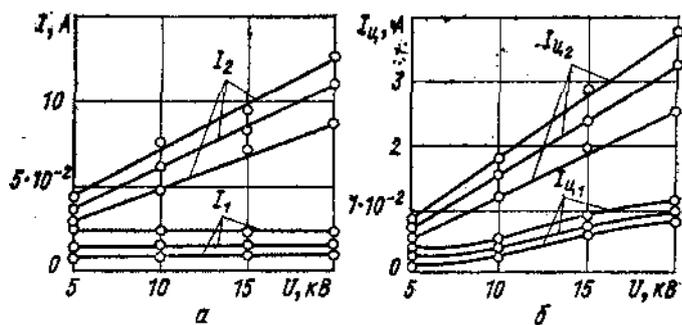


Рис. 65. Зависимости полного электронного тока (а) и тока на цилиндр Фарадея (б) от ускоряющего напряжения

I_1 и $I_{ц1}$ — токи в первой стадии;
 I_2 и $I_{ц2}$ — токи во второй стадии

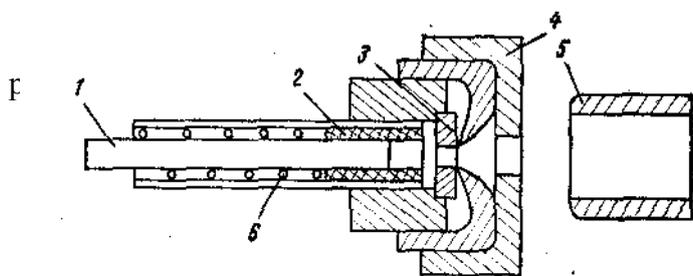


Рис. 66. Схема ПИЭЛ с искровым разрядом

1 — анод разрядного промежутка; 2 — рабочее тело; 3 — диафрагма; 4 — катод; 5 — ускоряющий электрод; 6 — пружина

причем максимальная энергия электронов достигает $3eU$, что связано с возникновением перенапряжения на промежутке при развитии неустойчивостей.

На основе искрового источника плазмы, разработанного А. А. Плюто, был также создан ПИЭЛ (рис. 66). Основной конструктивной особенностью источника является подача в искровой промежуток с помощью пружины рабочего тела в виде трубки 2 из оргстекла по мере ее сгорания в разряде. Кроме того, для улучшения фокусировки пучка использован изолированный эмиттерный электрод 4, находящийся под плавающим потенциалом. Ускоряющее (извлекающее) напряжение прикладывалось между диафрагмой 3 и ускоряющим электродом 5, а разрядное напряжение— между анодом 1 искровой промежутка и диафрагмой 3. Крутизна импульса электронного тока растет при задержке импульса ускоряющего напряжения относительно импульса разрядного тока. При ускоряющем напряжении $U=60$ кВ максимальный ток электронного пучка составляет $I=600$ А длительностью до 10^{-6} с.

Токопрохождение в ПИЭЛ с искровыми источниками плазмы улучшается при использовании плазменной линзы, расположенной в области отверстия в ускоряющем электроде. Принцип действия такой линзы в ПИЭЛ применительно к диоду со взрывной эмиссией рассматривался выше. В искровом ПИЭЛ с плазменной линзой (рис. 67) отбор электронов производится с развитой поверхности плазмы, заполняющей экспандер 2. Импульс ускоряющего напряжения между электродами 2 и 5 подается с задержкой $(0,6—1,5) \cdot 10^{-6}$ с относительно синхронно запускаемых искровых источников плазмы 1 и 4. ПИЭЛ

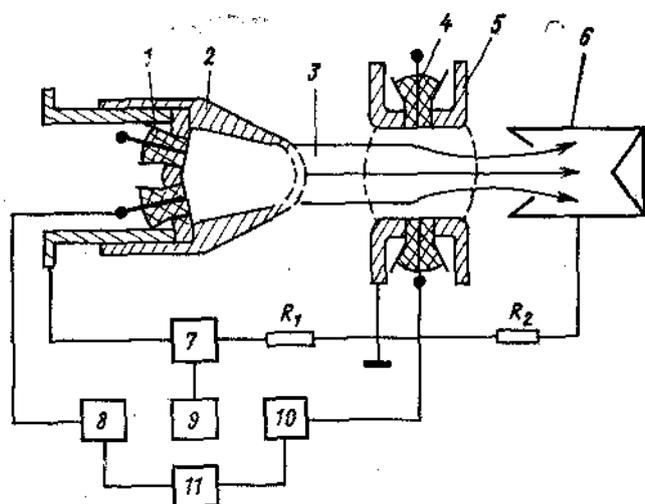


Рис. 67. Схема искрового ПИЭЛ с плазменной линзой :

1, 4— искровые источники; 2— экспандер; 3— ускоряющий промежуток; 5— анод; 6— цилиндр Фарадея; 7— ГИН; 8, 10— блоки поджига; 9— блок запуска; 11— синхронизатор

обеспечивает при напряжении 100 кВ пучок с током 50 кА длительностью $2 \cdot 10^{-7}$ с при коэффициенте токопрохождения 90%.

22. ФОРМИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПУЧКОВ В ПРЯМОМ РАЗРЯДЕ

В последние годы наряду с расширением исследований и применения рассмотренных выше известных способов формирования электронных пучков с помощью плазмы значительное внимание обращается на получение интенсивных электронных пучков в результате неустойчивостей в плотной плазме при протекании в ней тока.

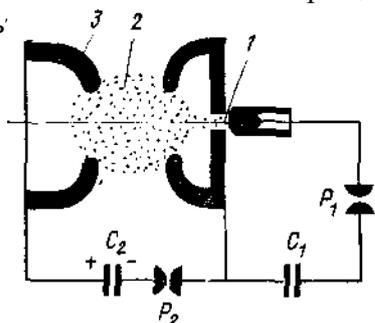


Рис. 68. Схема ПИЭЛ с прямым разрядом:

1— искровой промежуток; 2— ускоряющий промежуток; 3— ускоряющий электрод; P_1 и P_2 — разрядники

Теоретически и экспериментально показано, что в плазме, которая помещена в электрическое поле, приближающееся к полю Драйзера или превышающее его, возникает неустойчивость тока типа срывов. В момент срыва тока приложенное напряжение сосредотачивается в небольшой части плазменного столба, что приводит к возникновению ускоренного электронного пучка с током, сравнимым с током разряда в момент наступления неустойчивости. При этом значительная часть энергии внешней цепи расходуется на ускорение электронов. Область, в которой происходит основное падение напряжения, может перемещаться вдоль плазменного столба. Чтобы получить электронные пучки за счет такой неустойчивости, необходимо использовать протекание тока в ускоряющем промежутке, предварительно заполненном плазмой. Схема ПИЭЛ, в котором реализован этот способ, приведена на рис. 68. При срабатывании разрядника P_1 происходит пробой искрового промежутка 1. Плазма искры проникает в ускоряющий промежуток 2. В результате срабатывания разрядника P_2 в промежутке 2, заполненном плазмой концентрацией 10^{18} — 10^{19} м⁻³, возникает ускоряющее поле и начинает протекать ток. В отличие от ранее рассмотренных ПИЭЛ в этом источнике в начальной стадии ускоряющий промежуток закорочен плазмой и напряжение на нем мало. Однако при достижении током некоторого критического значения происходит его срыв, сопровождающийся резким повышением напряжения до значения, превышающего начальное напряжение источника питания. При этом в ускоряющем промежутке формируется электронный пучок, до 50% которого проходит через сетку в аноде промежутка на цилиндр Фарадея. Осциллограммы тока приведены на рис. 69. Критический ток возрастает с повышением концентрации плазмы и достигает $2 \cdot 10^4$ А. При напряжении 30 кВ ток электронного пучка длительностью $3 \cdot 10^{-7}$ с составляет 10^4 А. Как показали зондовые измерения, при достижении критического тока ускоряющая разность потенциалов сосредоточивается в слое объемного заряда вблизи отрицательного электрода, с обеих сторон которого имеется плазма. При прохождении в плазме ускоренного пучка происходит ионная фокусировка, в результате чего плотность электронного тока на оси возрастает до $2 \cdot 10^6$ А/см². Предполагается, что при увеличении ускоряющего напряжения и концентрации плазмы этот метод позволит формировать пучки с током 10^5 — 10^6 А.

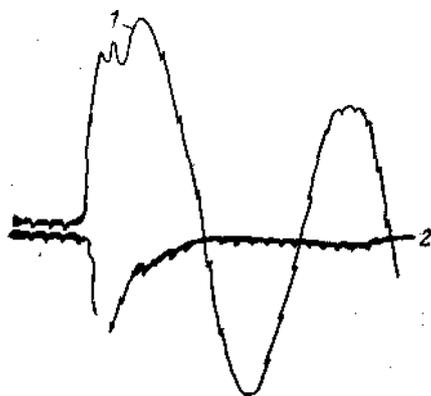


Рис. 69. Осциллограммы токов

1 — общий ток; 2 — ток на цилиндре Фарадея

Аналогичные результаты получены на установке «Аспа». Электронный пучок генерируется при разряде конденсатора емкостью 0,2 мкФ на промежуток, заполненный водородной плазмой концентрацией $(1 \div 7) \cdot 10^{19}$ м⁻³ и электронной температурой $T_e \approx 2 \cdot 10^4$ К. Плазма поступает в ускоряющий промежуток из коаксиального инжектора. Промежуток находится в продольном магнитном поле с индукцией 0,25 Тл. В результате развития в плазме неустойчивости типа обрыва тока возникает электронный пучок, который через сетку выходит из промежутка. Ток пучка сравним с током в плазме в момент его обрыва и достигает 10—15 кА со средней энергией электронов в пучке 5—20 кэВ при длительности 0,4—0,6 с. Плотность тока в пучке составляет ~ 70 А/см². При увеличении начальной

плотности плазмы в промежутке, как и в описанном выше ПИЭЛ, срыв тока происходит при большем его значении, и длительность пучка уменьшается. Ранее на той же установке при использовании плазмы с меньшей плотностью ($n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$) и напряжении 3 кВ получен электронный пучок с током порядка 10^2 А при длительности $\sim 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Область основного падения потенциала, в котором происходило ускорение пучка, имеет протяженность $\sim 200 \text{ мм}$ и локализуется от разряда к разряду в различных частях установки. Ток пучка составляет (50—100)% тока, протекающего в ускоряющей промежутке в момент возникновения неустойчивости. С повышением начального давления от $(1 \div 1,5) \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5} \text{—} 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ обрывы тока прекращаются и электронный пучок не возникает. Условия возбуждения срывов тока при использовании водородной, аргонной или ксеноновой плазмы аналогичны.

Плазма поступает в ускоряющий промежуток из искрового источника через осевое отверстие в отрицательном электроде этого промежутка. Плотность тока на оси пучка оценивается по току пучка I , проходящего через малое отверстие в ускоряющем электроде на цилиндр Фарадея. Бомбардировка высокоэнергетичным электронным пучком ускоряющего электрода приводит к его эрозии и образованию кратера. Изменение геометрии ускоряющего электрода путем нарушения его осевой симметрии и связанное с ним значительное изменение конфигурации поля в вакууме не влияют на положение кратера. Это позволяет заключить, что сформированный в промежутке электронный пучок ускоряется напряжением, сосредоточенным в катодной части промежутка. При длине промежутка $l_0 = 10 \text{ мм}$, амплитуде напряжения $U_0 = 30 \text{ кВ}$, емкости конденсатора, разряжающегося на промежуток, $C = 5 \cdot 10^{-3} \text{ мкФ}$ максимальный ток пучка, проходящего через отверстие диаметром $d_0 = 1 \text{ мм}$, составляет $I = 45 \text{ А}$, что соответствует плотности $j = 5,7 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$. Это значение приосевой плотности тока пучка по порядку величины близко к плотности тока. С увеличением длины промежутка плотность тока на оси уменьшается почти линейно. При $U_0 = 42 \text{ кВ}$, $l_0 = 12 \text{ мм}$, $d_0 = 12 \text{ мм}$ ток пучка на цилиндр Фарадея достигал $I = 4 \text{ кА}$ при длительности $(2 \text{—} 5) \cdot 10^{-8} \text{ с}$. От импульса к импульсу пучок изменяется по длительности и по току.

Улучшение методики исследования формирования электронных пучков в прямом разряде позволяет выявить важные особенности этого явления (рис. 70). Прямой разряд возбуждается в заполненной плазмой стеклянной трубке 4 (диаметр 8, длина 60 см) между сетчатым катодом 2 и анодом 5. Плазма создается электронным пучком с током 4 А, энергией 10 кэВ, длительностью $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, который инжектируется от источника 1 в различные газы при давлении $(2 \text{—} 5) \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ Трубка помещается в магнитное поле $(2 \text{—} 5) \cdot 10^{-1} \text{ Тл}$. Степень ионизации плазмы близка к 100%. Разрядное напряжение до 30 кВ от конденсаторной батареи $C = 0,4 \text{ мкФ}$ прикладывается к промежутку с задержкой 10—100 мкс после окончания инжекции электронного пучка. Ток пучка, сформированного в разряде, проходит через сетчатый анод на коллектор и измеряется поясом Роговского 6. Ток разряда регистрируется поясом 3. Для измерения распределения потенциала вдоль столба разряда используются емкостные зонды 7.

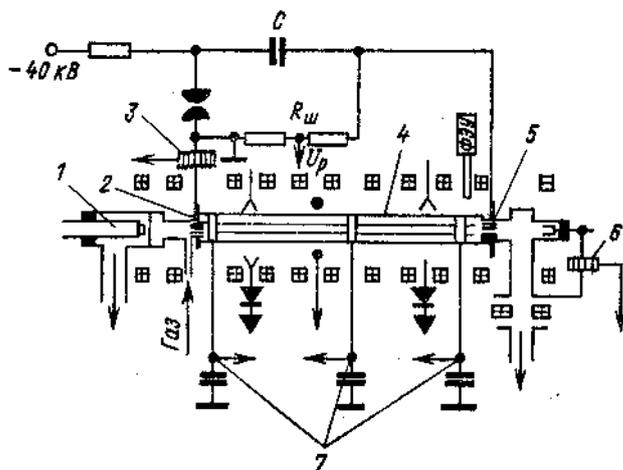


Рис. 70. Схема экспериментальной установки [150]:

1 — источник электронов; 2 — катод; 3, 6 — пояса Роговского; 4 — разрядная камера; 5 — анод; 7 — емкостные зонды

Эксперименты показали, что при концентрации плазмы 10^{17} — 10^{19} м⁻³ в начальной стадии разряда приложенное напряжение сосредоточивается в прикатодном слое, что согласуется с результатами работ. Протяженность слоя составляет 2—5 см. Такое перераспределение напряжения вызывается образованием вблизи катода слоя положительного объемного заряда вследствие ограниченной электронной эмиссии с сетчатого холодного катода. Зависимость тока в начальной стадии от концентрации плазмы (рис. 71) свидетельствует о возможности существования трех форм разряда, отличающихся величиной и характером изменения разрядного тока. Осциллограммы, соответствующие этим формам разряда, приведены, на рис. 72. Возможны также условия, в которых все три формы наблюдаются последовательно, как стадии развития прямого разряда. В первых двух формах в промежутке образуется электронный пучок, которым переносится весь ток разряда. Максимальная энергия электронов в пучке, поступающем на коллектор, соответствует приложенному к промежутку напряжению.

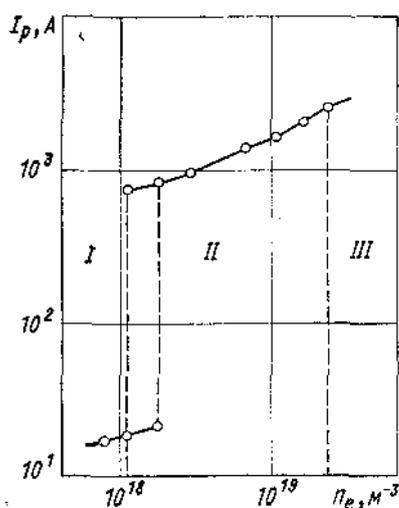


Рис. 71. Зависимость тока разряда от концентрации плазмы

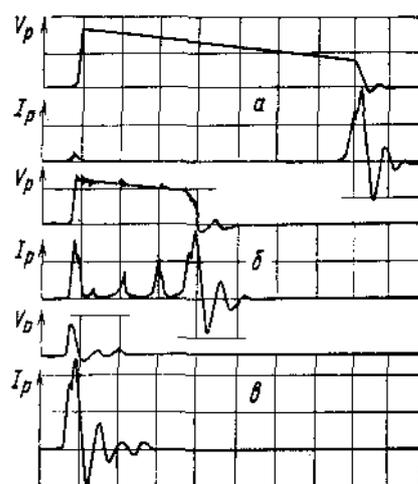


Рис. 72. Осциллограммы напряжения и токов разряда при $U=15$ кВ:

в области I (а), в области II (б), в области II (в)

Во второй форме разряда всплески тока пучка до 10^3 А длительностью $(1-2) \cdot 10^{-6}$ с при постоянном напряжении сменяются паузами продолжительностью $(1-2) \cdot 10^{-6}$ с, во время которых ток составляет 20—40 А. С повышением напряжения ток первого всплеска возрастает, его длительность сокращается и одновременно уменьшаются паузы между всплесками. При $U > 30$ кВ всплески токов слипаются, образуя один импульс тока длительностью 5 мкс с амплитудой более 10^3 А и колебаниями тока в пределах импульса 300—400 А. Рост начальной концентрации плазмы вызывает увеличение тока пучка. Тренировка катода разрядами и обезгаживание приводят к уменьшению тока и возбуждению вместо второй формы разряда первой при постоянной начальной концентраций плазмы.

В отличие от первой формы разряда, где напряжение все время сосредоточено в прикатодном слое, во второй к моменту срыва тока перед первой паузой слой пространственного заряда отходит от катода и перемещается вдоль столба разряда. Сначала скорость его движения составляет $2 \cdot 10^5$ м/с, а затем уменьшается до 10^3 м/с и ниже. Отрыв слоя объясняется образованием и перемещением к аноду перепада концентрации плазмы в результате повышения концентрации плазмы у катода до 10^{19} м⁻³ и уменьшения ее в

остальном объеме трубки. Увеличение концентрации прикатодной плазмы может вызываться газовыделением из катода и действием катодных пятен, а понижение происходит в результате взаимодействия сильноточного пучка с плазмой. После срыва тока концентрация анодной плазмы возрастает во время паузы примерно до 10^{18} м^{-3} .

Сосредоточение напряжения, которое приложено к заполненному плазмой промежутку, в относительно узкой его области объясняется в работе не обрывами тока вследствие превышения в плазме поля Драйсера, а образованием двойного электрического слоя подобного слою, возникающему в контрагированных разрядах в местах сужения разряда. В обоих случаях двойной слой образуется за счет неоднородности плазмы. При этом перемещение двойного слоя вызывается несоответствием между эмиссионной способностью катодной плазмы на границе двойного слоя и пропускной способностью разрядного промежутка.

Обращает на себя внимание некоторая аналогия в поведении прямого разряда в промежутке, заполненном плазмой, и в формировании высоковольтного импульсного разряда в ускоряющем промежутке ПИЭЛ с поджигающим электродом. Подобие форм разряда и их последовательности при развитии разряда, качественно одинаковые зависимости тока и длительности токового импульса от напряжения (см. рис. 60), давления газа (начальной концентрации плазмы) и обезгаживания катода позволяют говорить об общности процессов в прямом разряде и в разряде, который возбуждается в диоде с плазменным катодом при взаимодействии электронного пучка с собственной плазмой.

Представляет значительный интерес еще один способ получения электронных пучков с помощью нестационарной плазмы. Было обнаружено, что в нецилиндрическом z -пинче в дейтерии с примесью ксенона при определенных условиях происходит срыв токовой оболочки и образуется мощный электронный пучок, попадающий на анод установки. Электроны в пучке, которым переносится весь разрядный ток порядка 10^6 А , ускоряются за счет энергии магнитного поля, запасенной в камере. О возникновении пучка с таким током и значительной энергией свидетельствует интенсивное коротковолновое рентгеновское излучение и откол металла с тыльной стороны анода. Образование пучка при разрушении токовой оболочки объясняется ухудшением проводимости в прианодной области в результате появления в ней плотных паров материала анода. Недостатками этого способа генерирования сильноточных электронных пучков являются относительно малая длительность пучка, составляющая 10^{-7} с , и широкий энергетический спектр электронов (30—100 кэВ).