

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

К плазменным источникам электронов (ПИЭЛ) будем относить устройства, в которых для получения электронных пучков используется плазма (рис. 1). Во многих случаях отбор электронов производится с границы плазмы, образованной в локализованном объеме (см. рис. 1, а – г, е). Уход электронов из плазмы восполняется электронной эмиссией с катода и ионизацией газа. Плазма, из которой можно извлекать электроны, создается с помощью газовых разрядов (см. рис. 1, а – г), при взрыве проводников, в частности, катодных микровыступов (см. рис. 1, е), в результате поверхностной ионизации атомов, например цезия на вольфраме, и другими способами. Существуют ПИЭЛ, в которых пучок образуется из электронов, эмиттированных холодным катодом под действием бомбардировки его ионами плазмы (см. рис. 1, д). Кроме того, высокоэнергетичные электронные пучки создаются в плазме при протекании в ней тока за счет возникновения неустойчивостей определенного типа.

Плазма в ПИЭЛ служит: 1) для возбуждения электронной эмиссии из холодного катода; 2) для защиты расположенного определенным образом в разрядной камере катода от бомбардировки высокоэнергетичными ионами, поступающими из ускоряющего промежутка и, запыления парами обрабатываемого материала (см. рис. 1, б, в); 3) для перехода от плотности эмиссионного тока катода к плотности тока пучка (увеличение плотности тока может быть достигнуто за счет сжатия столба разряда и размножения электронов в результате ионизации газа, а уменьшение плотности тока и увеличение эмигрирующей поверхности – за счет расширения плазмы в экспандере): 4) для устранения зависимости электронно-оптических свойств ПИЭЛ от степени эрозии катода (см. рис. 1, а–г, е) и осуществления эмигрирующей поверхностью плазменной фокусировки пучка (см. рис. 1, б–г); 5) для получения наряду с электронным пучком ионного потока при смене полярности ускоряющего напряжения (см. рис. 1, а–б)

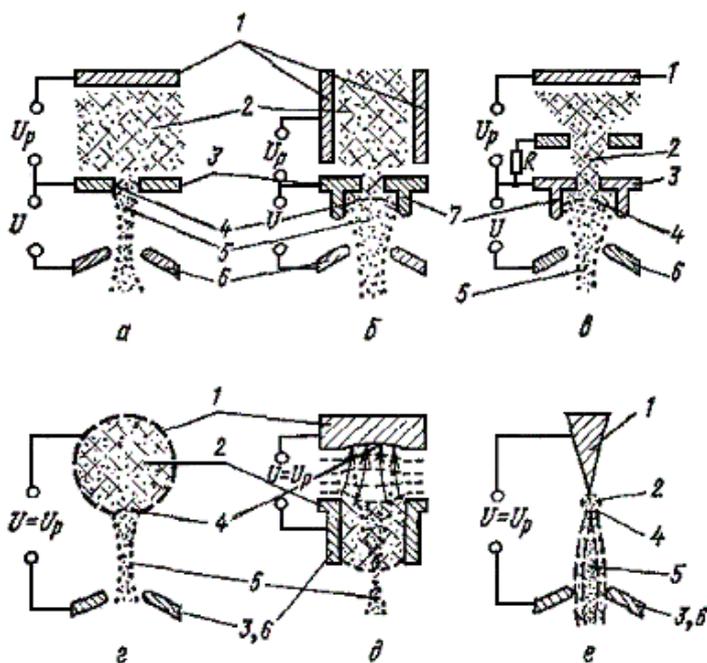


Рис. 1. Схемы плазменных источников электронов (ПИЭЛ): 1 – катод; 2 – плазма; 3 – анод разрядной камеры; 4 – эмиттирующая граница плазмы; 5 – пучок; 6 – извлекающий (ускоряющий) электрод; 7 – экспандер

В ПИЭЛ плазма выполняет несколько из перечисленных функций, хотя одна из них, как правило, является основной. Так, в источниках с взрывной эмиссией электронов (см. рис. 1, е) и в источниках с высоковольтным тлеющим разрядом (см. рис. 1, д) плазма в основном стимулирует электронную эмиссию из холодного катода.

По аналогии с ионными источниками целесообразно классификацию ПИЭЛ проводить по способу получения плазмы и ее особенности (табл. 1).

2. ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

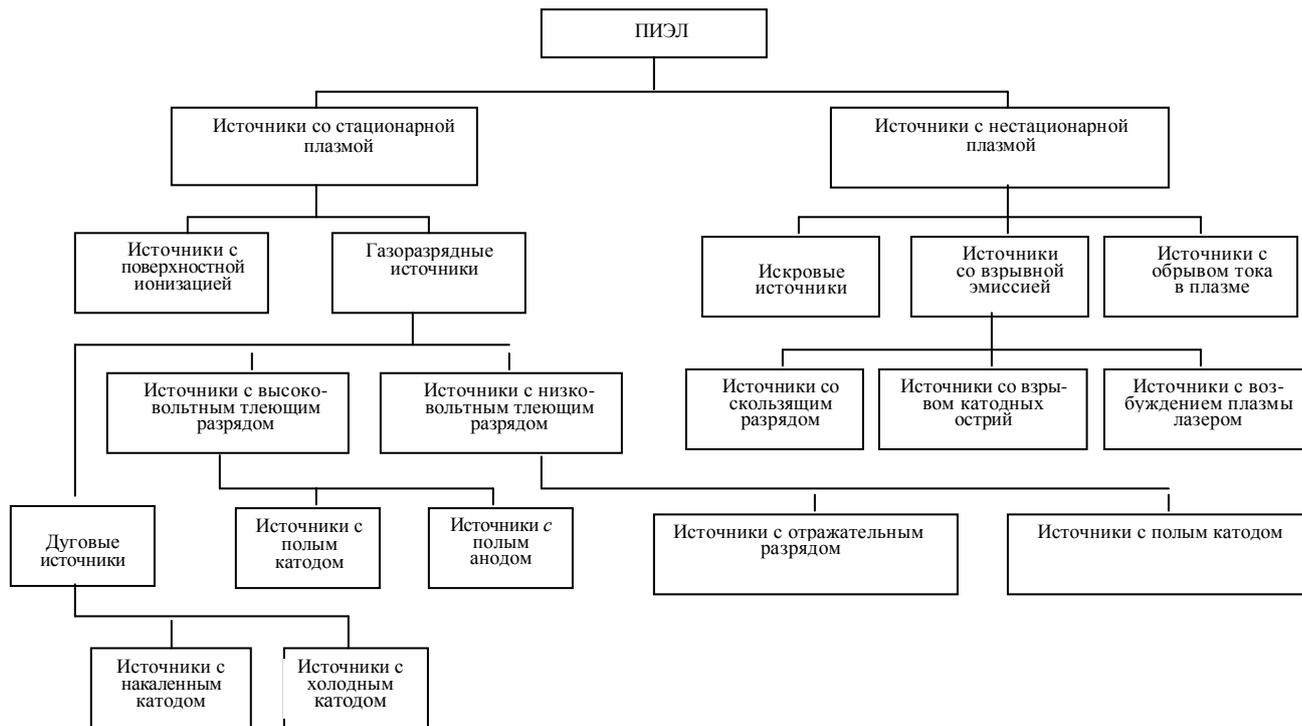
Параметры ПИЭЛ целесообразно разделить на две группы: 1) эксплуатационные, которые позволяют определять практическое применение ПИЭЛ, характеризуют их как электронно-лучевые устройства и позволяют сравнивать ПИЭЛ с другими электронными источниками и 2) физико-технологические, которые описывают особенности ПИЭЛ как плазменных устройств и позволяют сравнивать ПИЭЛ различных типов.

Эксплуатационные параметры. Номинальный ток электронного пучка I . При отборе электронов с границы стационарной плазмы, созданной с помощью газового разряда (см. рис. 1, а – г) или за счет поверхностной ионизации, ток пучка.

$$I = f_1 f_2 j S_0, \quad (1)$$

где j – плотность электронного теплового тока в плазме вблизи: эмиссионного отверстия; S_0 – площадь эмиссионного отверстия; f_1 – коэффициент токопрохождения, учитывающий потери пучка на ускоряющем и других электродах; f_2 – коэффициент порядка единицы, зависящей от положения плазменной эмиссионной поверхности.

Классификация ПИЭЛ



Для варианта ПИЭЛ рис. 1, а $f_2 \approx 1$; для ПИЭЛ рис. 1, б, в $f_2 < 1$ вследствие потерь электронов на стенках экспандера; для ПИЭЛ рис. 1, г $f_2 < 1$, поскольку площадь плазменной эмиссионной поверхности превышает площадь эмиссионного отверстия.

Стартовый ток пучка $I_{ст}$. В отдельных случаях ПИЭЛ должны при значительном номинальном токе пучка обеспечивать и работу при малых токах. Малый ток применяется, например, при технологическом использовании ПИЭЛ для совмещения сфокусированного пучка с местом обработки.

В пушках с термокатодом ток пучка уменьшается специальным управляющим электродом при постоянной эмиссии катода или изменением эмиссии при уменьшении тока накала катода. Первый способ усложняет конструкцию пушек и требует отдельного источника питания, находящегося под высоким напряжением, а второй обладает большой инерционностью.

В ПИЭЛ, имеющих разрядную камеру (см. рис. 1, а – в), возможно эффективное управление током пучка за счет изменения эмиссионной способности плазмы регулировкой тока разряда. Однако каждая разрядная камера характеризуется минимальным током, при

котором еще не гаснет разряд, причем ток зависит от формы разряда, давления газа, материала катода и других факторов.

Ускоряющее (извлекающее) напряжение V определяет энергию электронов и мощность пучка. В отличие от пушек с термокатодом в ПИЭЛ от ускоряющего напряжения зависит также положение и форма эмиссионной поверхности (см. рис. 1, а – г) или протяженность области, в которой сосредоточено это напряжение (см. рис. 1, д, е). Таким образом, ПИЭЛ являются электронно-лучевыми системами с переменным первеансом. Кроме того, ускоряющее напряжение влияет на устойчивость отбора электронов из плазмы и стабильность горения разряда.

Размеры сечения пучка на выходе ПИЭЛ зависят от его назначения, конструкции и возможностей используемого способа получения пучка с помощью плазмы. Например, для технологических применений обычно требуются пучки с круглым сечением малого диаметра, а также узкие кольцевые и ленточные пучки, в то время как в квантовой электронике используются пучки с большим сечением прямоугольной формы. Минимальный диаметр пучка определяется параметрами системы его формирования и фокусировки, а также свойствами эмиттера. В отсутствие aberrаций и действия пространственного заряда максимальная плотность тока в сфокусированном пучке

$$j_{\text{макс}} = j_0 \left[\left(\frac{eU}{kT_e} \right) + 1 \right], \quad (2)$$

где j_0 – плотность тока эмиссии; T_e – электронная температура. При стационарном отборе электронов с плазменной поверхности это соотношение при $eU/kT_e \gg 1$ можно представить в следующем виде:

$$j_{\text{макс}} = e^2 n_e U / \sqrt{\pi m k T_e}, \quad (3)$$

где n_e – концентрация плазмы.

Поскольку электронная температура плазмы на порядок и более превышает температуру термокатодов, то пушки с термокатодом при одинаковой плотности тока эмиссии позволяют получать пучки с меньшим сечением, чем ПИЭЛ. Однако плазма обеспечивает значительно большую плотность эмиссионного тока, чем термокатоды, что в значительной мере компенсирует отрицательное влияние высокой электронной температуры на фокусировку пучка.

С помощью ПИЭЛ электронные пучки большим сечением получают тремя способами:

- 1) формированием пучка, извлеченного с малой эмиссионной поверхности, до требуемых размеров соответствующей электроннооптической системой;
- 2) отбором электронов из плазмы, которая возбуждается в объеме с сечением, близким к требуемому сечению пучка;
- 3) отбором электронов с большой плазменной поверхности, которая образуется в результате расплывания плотной плазмы, проникающей из малого объема через эмиссионное отверстие в специальный экспандер.

Глубина ВЧ-модуляции тока пучка $K_M = 2\Delta I / I_{\text{макс}}$, где ΔI – амплитуда переменной составляющей тока; $I_{\text{макс}}$ – максимальный ток пучка. При извлечении электронов из газоразрядной плазмы (см. рис. 1, а – в) модуляция тока ПИЭЛ вызывается колебаниями в разряде, неустойчивостью эмиссионной плазменной поверхности, а также неустойчивостью пучка в промежутке между плазменной поверхностью и ускоряющим электродом. В источниках других типов (см. рис. 1, е) при определенных условиях также наблюдаются колебания тока.

Модуляция тока – характерная особенность ПИЭЛ, которые работают при времени, превышающем время развития соответствующих неустойчивостей. Однако это не является препятствием для некоторых применений ПИЭЛ (техника, источники излучения), а в других случаях с помощью специальных мер удается снизить глубину модуляции до приемлемого значения.

Эксплуатационные параметры не ограничиваются рассмотренными, сюда же следует отнести срок службы ПИЭЛ, время готовности к работе и многие другие параметры.

Физико-технологические параметры. Эффективность извлечения электронов. В большинстве ПИЭЛ (см. рис. 1, а – г) эмиттером электронов служит газоразрядная плазма.

Поэтому при выбранном способе генерирования плазмы необходимо обеспечить условия эффективного извлечения из нее электронов. Степень использования плазмы в ПИЭЛ оценивается параметром эффективности извлечения

$$\alpha = I / I_p, \quad (4)$$

где I_p – ток разряда.

При извлечении электронов через отверстие в аноде разрядной камеры (см. рис. 1, а – в), пренебрегая ионной составляющей анодного тока, можно считать, что и характеризует долю образующихся в разряде электронов, которые сформированы в пучок. Возможны три пути повышения эффективности извлечения электронов из газоразрядной плазмы:

1) создание неоднородной плазмы с повышенной плотностью в области токоотбора, чтобы выполнялось соотношение [1]:

$$\alpha = \int_{S_s} j_s dS / \int_{S_a} j_a dS \gg S_0 / S_a \quad (5)$$

где j_a и j_s – плотности анодного и эмиссионного токов; S_0 , S_a , S_s – площади эмиссионного отверстия, токоприемной поверхности анода и плазменной эмиссионной поверхности;

2) увеличение отношения S_0/S_a уменьшением размеров разрядной камеры при постоянных значениях j_s и S_0 ;

3) увеличение отношения S_s/S_a расширением эмиссионной поверхности S_s при постоянных значениях j_s и S_a .

Неоднородная плазма с высокой локальной плотностью теплового тока создается:

- контрагированием разряда, т. е. сжатием его анодной части, чтобы диаметр канала разряда вблизи эмиссионного отверстия был соизмерим с диаметром этого отверстия. Возможно контрагирование отверстием в специальном электроде, помещенном в разрядный промежуток, сужением в разрядной трубке однородным и неоднородным магнитными полями, а также ионным потоком, поступающим в разрядную камеру из ускоряющего промежутка;

- использованием в разрядной камере катода специфичной формы или с неоднородной эмиссией, обеспечивающими неравномерность распределения плотности анодного тока. Примером такого катода может служить плоский катод с центральной цилиндрической полостью, вдоль оси которой в разряде образуется плотный плазменный столб;

- использованием в разрядной камере анода рациональной формы, которая обеспечивает неравномерное распределение плотности анодного тока.

При уменьшении размеров разрядной камеры эффективность извлечения электронов повышается, но она ограничивается ухудшением условий зажигания и горения разряда. Увеличение эмиссионного отверстия приводит к недопустимому снижению давления в разрядной камере при постоянном напуске газа или недопустимому повышению давления в ускоряющем промежутке при постоянном давлении в разряде. Кроме того, увеличение этого отверстия усиливает связь между областью разряда и ускоряющим промежутком, что может вызвать нестабильность горения разряда и даже его погасание при высоком напряжении. Обычно эмиссионные отверстия в ПИЭЛ, как и в ионных источниках, имеют диаметр порядка 1 мм и возможности его изменения для увеличения эмиссионного тока довольно ограничены.

Энергетическая эффективность характеризует экономичность эмиттера и выражается как

$$H = I / P_s, \quad (6)$$

где I – ток электронной эмиссии; P_s – мощность, затраченная на его получение.

При отборе электронов из плазмы (см. рис. 1, а – г, е) P_s – мощность, расходуемая на ее возбуждение. При использовании ионно-электронной эмиссии (см. рис. 1, д) $P_s = P_1 + P_2$, где P_1 – мощность, выделяемая на катоде ионами; P_2 – мощность, которая затрачена на возбуждение прианодной плазмы, служащей источником ионов. Энергетическая эффективность термокатодов также выражается соотношением (6). В этом случае P_s – мощность накала катода.

Пути повышения энергетической эффективности зависят от типа ПИЭЛ. Для ПИЭЛ на основе извлечения электронов из газоразрядной плазмы энергетическую эффективность с учетом (4) и (6) можно выразить как $H = \alpha/U_p$, где U_p – напряжение горения разряда. Таким образом, повышение H достигается снижением напряжения горения разряда при постоянной эффективности извлечения.

Расход рабочего вещества. Плазма в ПИЭЛ образуется в результате ионизации рабочего вещества, которым в источниках различных типов служит напускаемый в ПИЭЛ газ, испаряющийся материал электродов, а также специально вносимое легко испаряющееся или ионизирующееся вещество (оргстекло, цезий). Некоторая часть рабочего вещества остается в плазменной камере в результате внедрения ионов в электроды, адсорбции атомов на пленках напыленного материала электродов и конденсации паров на стенках. Однако большая часть в виде потока нейтральных атомов (нейтралов) проникает в ускоряющий промежуток и удаляется с помощью откачных средств.

Расход рабочего вещества определяется необходимым давлением в плазменной камере. В газоразрядных ПИЭЛ, работающих при постоянном напуске газа, его расход составляет $Q = (1 - 100) \text{ см}^3/\text{ч}$. Газовая экономичность, выражаемая по аналогии с ионными источниками как $\Gamma = I/Q$, определяет удельный расход газа и в совокупности с параметрами α и H позволяет достаточно полно характеризовать используемые в ПИЭЛ способы получения электронных пучков с помощью плазмы.