

## ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ

### 23. ОБРАЗОВАНИЕ ЦЕЗИЕВОЙ ПЛАЗМЫ В ПОЛЫХ НАКАЛЕННЫХ КАТОДАХ

Кроме плазмы, образованной в электрических разрядах, при инжекции электронных пучков в газ, а также при взаимодействии лазерного луча с твердой мишенью, для получения электронных пучков может использоваться плазма, которая возникает при поверхностной ионизации атомов на раскаленной металлической поверхности. В последнем случае обычно применяются полые накаленные катоды, в которых эмиссия электронов происходит с внутренних стенок полости, ионы в полости образуются в результате попадания на внутренние стенки потока атомов с малым потенциалом ионизации, а отбор электронов в ускоряющий промежуток производится с границы синтезированной в полости плазмы через апертуру полости. При этом основная функция плазмы в ПИЭЛ состоит в том, чтобы компенсировать отрицательный пространственный заряд у поверхности термокатода и обеспечить электронную эмиссию с плотностью тока, значительно превышающей плотность эмиссионного тока термокатода. Кроме того, использование явления эмиссии из плазмы уменьшает зависимость характеристик ПИЭЛ от бомбардировки катода высокоэнергетичными ионами.

При попадании атомов на поверхность нагретого металла часть из них испаряется в вакуум в виде ионов. Доля ионизованных атомов определяется формулой Саха—Ленгмюра

$$\alpha = \{1 + 2 \exp[-(eU_i - \varphi)/kT]\}^{-1}, \quad (46)$$

где  $U_i$ — потенциал ионизации падающих атомов;  $\varphi$ — эффективная работа выхода электрона из металла.

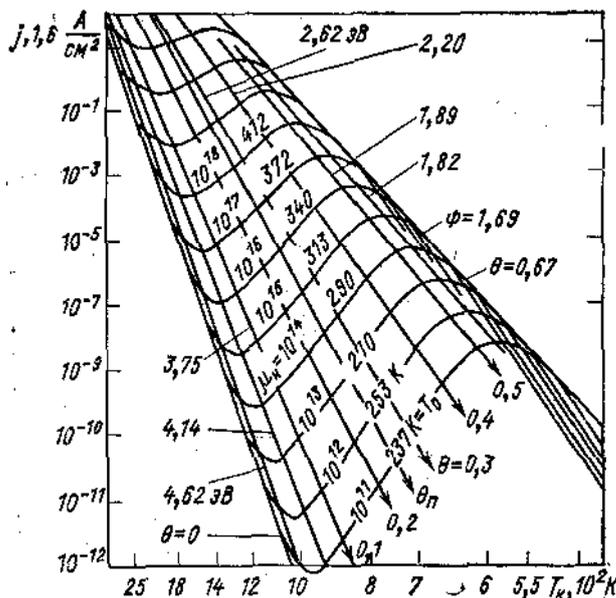


Рис. 73. Номограмма Тейлора—Ленгмюра

Для увеличения коэффициента поверхностной ионизации целесообразно использовать атомы с малым потенциалом ионизации и эмиттер с большой работой выхода, нагретый до высокой температуры. Обычно ионы получают этим методом введением паров цезия ( $U_i=3,89$  В) в катодную полость из вольфрама или тантала. При этом накаленный эмиттер наряду с ионами испускает электроны в соответствии с (6). Термоэлектронную эмиссию можно значительно усилить снижением работы выхода эмиттера при покрытии части поверхности  $\theta$  атомами цезия. Влияние паров цезия на электронную эмиссию вольфрама иллюстрируется известной номограммой Тейлора—Ленгмюра (рис. 73), определяющей зависимость плотности электронного тока от температуры вольфрама  $T_k$  и потока  $\mu_n$  падающих на вольфрам атомов цезия. При определенном соотношении между температурами катода и цезиевой ванны, из которой пары цезия поступают в катодную полость, смесь электронов и ионов в полости образует квазинейтральную плазму. По

сравнению с плазмой, получаемой в газовых разрядах, в том числе и с полыми катодами, плазма, синтезированная в катодной полости при поверхностной ионизации атомов и термоэлектронной эмиссии, отличается низкой электронной температурой, соизмеримой с температурой катода, высокой степенью ионизации и низким уровнем шумов.

В упрощенной модели полого катода с цезиевой плазмой предполагается, что поля в катодной полости отсутствуют, эмиттируемые электроны движутся до оси, а затем вдоль оси выходят из полости. Ионы же, покидая стенку полости, пересекают ее ось и попадают на противоположную стенку. Тогда, исходя из условия нейтральности плазмы ( $\rho_e = \rho_i$ ), соотношение между плотностями электронного и ионного токов, эмиттируемых катодом, можно записать в виде

$$j_i = (j_e \bar{v}_i / 2\bar{v}_e) = (j_e / 2) \sqrt{m/M} \approx j_e / 1000. \quad (47)$$

С другой стороны, плотность ионного тока

$$j_i = e\mu_n \alpha = eap / \sqrt{2\pi k T_k M}, \quad (48)$$

где  $\mu_n$  — поток атомов цезия на единичную поверхность катода;  $p$  — давление насыщенных паров цезия, связанное с температурой  $T_0$  цезиевой ванны уравнением  $\lg p = 11,5 - 1,35 \lg T_0 - 4040/T_0$ .

Из (46) и (47) следует, что поток атомов цезия, необходимый для компенсации отрицательного пространственного заряда, равен

$$\mu_n = (j_e / 2e) [1 + 2e(eU_i - \phi / kT_k)]. \quad (49)$$

На рис. 73 показана линия  $\theta_n$ , удовлетворяющая условию компенсации заряда. Кроме того, компенсация может быть обеспечена при  $\theta = 0$ , если поток атомов цезия соответствует (47). В последнем случае требуется более высокая температура катода, но значительно меньший поток атомов, почти полностью ионизирующийся на катоде.

В реальном полом катоде, заполненном плазмой, у поверхности катода образуется слой пространственного заряда, который тормозит частицы одного знака и ускоряет другого. От характера слоя и потенциального барьера, создаваемого им, зависят потенциал плазмы в апертуре катодной полости и соотношение между плотностью электронного тока в апертуре и плотностью тока термоэлектронной эмиссии с внутренних стенок катодной полости. Оба эти параметра можно изменять, регулируя поток атомов цезия в катодной полости.

## 24. ОСОБЕННОСТИ ПИЭЛ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМОЙ

Использование полого накаливаемого катода, заполненного плазмой, позволяет отбирать через малое отверстие в стенке катодной полости все электроны, испускаемые внутренними стенками катода. При этом плотность извлекаемого из плазмы тока может на три порядка превышать плотность тока термоэлектронной эмиссии и достигать  $10^3$  А/см<sup>2</sup>.

На рис. 74 показана конструкция ПИЭЛ, предназначенного для работы при невысоких температурах катода ( $\theta = \theta_n$  на рис. 73) и низких давлениях паров цезия. Основные элементы ПИЭЛ — на

Источником температуры катодом и в поверхности происходит корпуса ПИЭЛ независимо проточка, расположен пучков с бс вследствие большого ускорения

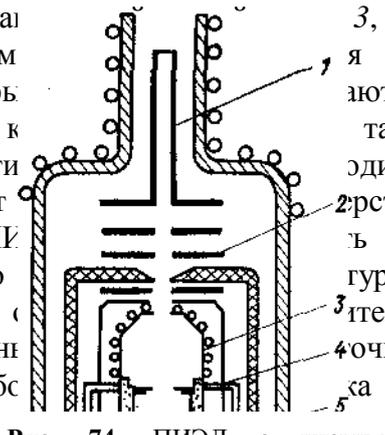


Рис. 74. ПИЭЛ с низким давлением паров цезия:

- 1 — коллектор; 2 — извлекающий электрод (анод); 3 — полый катод;
- 4 — колпачок; 5 — тепловой экран;
- 6 — магнитный экран; 7 — смесь;
- 8 — нагреватель

3, извлекающий электрод 2, коллектор электронов 1.

я смесь ают в кат такой си адит пов 2рствие в к ь работу гурах, в с 3ительный 4очки. Пол 5ка при ве ый про ым уд юбой

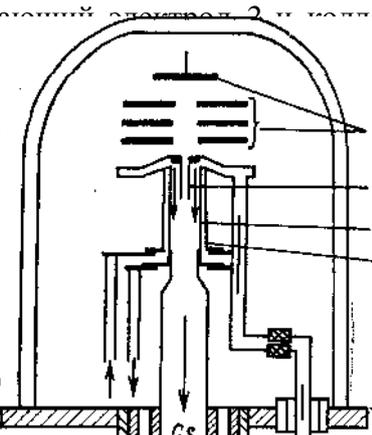


Рис. 75. ПИЭЛ с искусственно созданной плазмой:

- 1 — извлекающий электрод; 2 — цилиндр; 3 — полый катод; 4 — экран; 5 — конденсор; 6 — резервуар

Значительное (на два порядка) уменьшение потока нейтралов при сохранении высокой концентрации плазмы достигается в ПИЭЛ (рис. 75). Полый катод 3 в виде вольфрамового цилиндра с внутренним диаметром 4,75 мм и толщиной стенок 50 мкм подключен к источнику накала последовательно с цилиндрическим танталовым нагревателем 4. Нагрев катода происходит за счет теплового излучения нагревателя, на котором благодаря малой толщине стенок (25 мкм) и большому удельному сопротивлению тантала, по сравнению с вольфрамом, падает 75% напряжения источника накала. Остальное напряжение, распределенное по длине катодной полости, при положительной полярности ее торца с эмиссионным отверстием способствует движению электронов к отверстию. Однако, если напряженность поля превышает 100 В/см, неэквипотенциальность катодной полости вызывает перетекание электронного тока от одних участков катода к другим и уменьшает плотность плазмы в эмиссионном отверстии.

Пары цезия образуются в резервуаре 6, нагретом до температуры 420—470 К, и напускаются в катодную полость через кольцевую щель шириной 125 мкм между катодом и установленным внутри его цилиндром 2 длиной 6,35 мм. Благодаря такой системе подачи паров в полость поступает хорошо сколламированный поток атомов цезия, направленный вдоль стенок в сторону, противоположную направлению извлечения электронов. Вблизи поверхности катода создается слой атомов, который подвергается ионизации на поверхности вольфрама. При этом необходимое давление  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  мм рт. ст. достигается на поверхности при значительно меньшем потоке пара, чем в отсутствие узкой щели. Нейтральные атомы цезия улавливаются конденсором 5. Чтобы ионы цезия не могли выйти из катодной полости через эмиссионное отверстие диаметром 0,76 мм, в этой области создается электрическое поле, отражающее ионы. Расположение эмиттирующей плазменной поверхности внутри полости в соответствии с теоретическим анализом и рассмотренными выше экспериментальными данными должно также повысить устойчивость отбора электронов из плазмы.

Вольт-амперные характеристики ПИЭЛ с эквипотенциальным полым катодом, имеющим температуру 2425 К, приведены на рис. 76. При плотности тока в эмиссионном отверстии  $800 \text{ А/см}^2$  и ускоряющем напряжении 1,2 кВ в отсутствие продольного магнитного поля 40% тока пучка достигает четвертого анода, расположенного на расстоянии 0,6 см от плоскости эмиссионного отверстия.

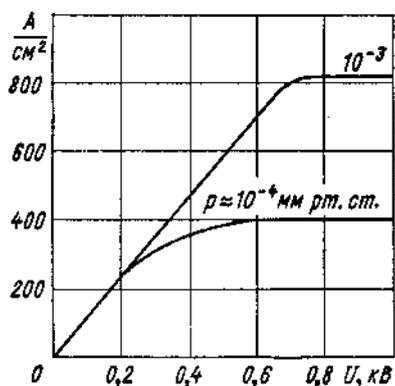


Рис. 76. Вольт-амперные характеристики ПИЭЛ при  $T_k=2425 \text{ К}$

Полностью ионизованная плазма, синтезированная из электронов и ионов, испускаемых накаливаемыми эмиттерами, позволяет получить не только очень плотные пучки, но и пучки с очень низким уровнем шумов. При этом уровень шумов оказывается не только ниже, чем при использовании газоразрядной плазмы, но и ниже, чем у термокатодов, работающих в режиме ограничения тока пространственным зарядом, когда вблизи эмиттера имеется виртуальный катод.