

Темы лекции

- 1. Характеристики электронных пучков.*
- 2. Источники ускоренных электронов.*
- 3. Термоэмиссионные и автоэмиссионные катоды и их характеристики.*
- 4. Основные узлы и характеристики электронной пушки.*

Электронные пучки принято разбивать на два класса:

- **Электронные пучки, в которых влияние объемного заряда на движение отдельных электронов пучка пренебрежимо мало.**
- **Электронные пучки, в которых объемный заряд влияет на движение электронов.**

Разбиение пучков на эти классы осуществляется на основании характеристики, называемой **первианс**

$$P = I/U^{3/2},$$

где  $I$  – ток электронного пучка,  $U$  – ускоряющее электроны напряжение. При  $P \leq 0,1$  мкА/В<sup>3/2</sup> влияния объемного заряда нет, при  $P > 0,1$  мкА/В<sup>3/2</sup> объемный заряд влияет на движение электронов. Например, при  $U = 100$  кВ для того, чтобы  $P > 0,1$  мкА/В<sup>3/2</sup> ток пучка должен быть  $> 3$  А. В методах элементного и структурного анализа используются исключительно низкопервиансные пучки, поэтому движение каждого электрона в пучке можно рассматривать независимо от движения других электронов.

**Источники ускоренных электронов до энергии  $\sim$  сотни кэВ принято называть электронными пушками**, при больших энергиях – ускорителями электронов. В дальнейшем речь будет идти об электронных пушках с низкопервиансными пучками.

**Назначение электронной пушки – сформировать электронный пучок с:**

- **требуемой энергией электронов;**
- **требуемой плотностью тока;**
- **требуемой угловой расходимостью;**
- **требуемым сечением на заданном расстоянии от электронной пушки.**

В методах элементного и структурного анализа используются пучки круглого сечения (аксиально-симметричные), хотя существующие электронные пушки позволяют получать трубчатые и ленточные пучки.

Источником электронов в электронных пушках является **электронный эмиттер**.

В подавляющем большинстве электронных пушек **используются термоэлектронные эмиттеры** (катоды), основанные на том, что при нагреве металла происходит увеличение энергии электронов зоны проводимости до величины, необходимой для преодоления работы выхода  $e\phi$ . Плотность тока термоэлектронной эмиссии определяется формулой Ричардсона

$$j_0 = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{k_B T}\right)$$

где  $A$  – константа (разная для разных материалов),  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура эмиттера.

Для конкретного материала (заданные  $e\phi$  и  $A$ ) повышение  $j_0$  возможно только за счет повышения  $T$ , однако здесь имеются **ограничения**, связанные

- с расплавлением термоэмиттера (рабочая температура должна быть меньше температуры плавления, поэтому используются, как правило, тугоплавкие материалы);
- с превышением давления насыщенных паров материала термоэмиттера рабочего давления в электронной пушке ( $< 10^{-5}$  Тор);
- с увеличением скорости испарения материала термоэмиттера с повышением температуры, что приводит к сокращению его срока службы.

Из чистых металлов наиболее распространенным материалом термоэлектронных эмиттеров является вольфрам ( $e\phi = 4,5$  эВ;  $A = 67$  А/см<sup>2</sup> · К), обладающий наименьшей скоростью испарения (наибольшим сроком службы) при температурах, обеспечивающих необходимую эмиссию. Для вольфрама  $T_{\text{плавл}} = 3650$  К,  $T_{\text{рабоч}} = 2623$  К, при этой температуре давление насыщенных паров вольфрама  $10^{-5}$  Тор. При такой рабочей температуре плотность тока, отбираемая с вольфрамового термоэмиттера 1 А/см<sup>2</sup>, скорость испарения  $10^{-8}$  г/см<sup>2</sup>·с. Основной недостаток вольфрама – низкая технологичность. Его трудно обрабатывать, он хрупок, особенно после нагрева. Для преодоления этих недостатков к нему добавляют 5% или 20% рения (сплавы ВР-5 и ВР-20).

Благодаря высокой рабочей температуре вольфрамового катода на нем мало что сорбируется, а то, что сорбируется, и образует с вольфрамом соединения в большинстве случаев быстро испаряется. Поэтому **вольфрамовый катод известен как наименее чувствительный к условиям эксплуатации.**

Помимо вольфрама в качестве материала термоэмиттера в электронных пушках также широко применяются монокристаллы из **гексаборида лантана** (**LaB<sub>6</sub>**), имеющие следующие характеристики:

$$e\phi = 2,66 \text{ эВ},$$

$$A = 40 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К},$$

$$T_{\text{плавл}} = 2540 \text{ К}.$$

Диапазон рабочих температур 1673-1973 К, при этом  $j_0 = 1-30 \text{ А/см}^2$ .

Поскольку чем выше рабочая температура, тем сложнее теплоотвод, то термоэмиттеры из LaB<sub>6</sub> имеют значительное преимущество перед W, так как при более низкой рабочей температуре у них значительно выше плотность отбираемого тока. Недостатком термоэмиттеров из LaB<sub>6</sub> является более низкое рабочее давление, чем у W.

По конструкции **термоэмиттеры** делятся на **прямокальные** (W, W-Re,), в которых разогрев осуществляется пропусканием электрического тока через металлическую проволочку, изогнутую в виде шпильки с радиусом закругления острия  $\sim 0,1$  мм.

**термоэмиттеры с косвенным подогревом** – обычно из гексаборида лантана. Разогрев термоэмиттера до рабочей температуры осуществляется тепловым излучением нагревателя – W-проволочки, нагреваемой пропусканием электрического тока.



Помимо термоэлектронных эмиттеров в электронных пушках также используют **автоэлектронные эмиттеры**, работа которых основана на **автоэлектронной эмиссии** – **испускание электронов проводящим твердым телом под действием внешнего электрического поля  $E$  достаточно высокой напряженности**. Автоэлектронная эмиссия сугубо отечественный термин, в зарубежной литературе это явление называется **полевой электронной эмиссией**.

Плотность тока  $j_0$  автоэлектронной эмиссии из металлов в вакуум следует закону Фаулера – Нордгейма

$$j_0 = C_1 E^2 \exp(-C_2 / E) \quad C_1 = e^3 / 8\pi h t^2(y) \phi, \quad C_2 = \frac{8\pi \sqrt{2m_e}}{3he} \phi^{3/2} \mathcal{G}(y)$$

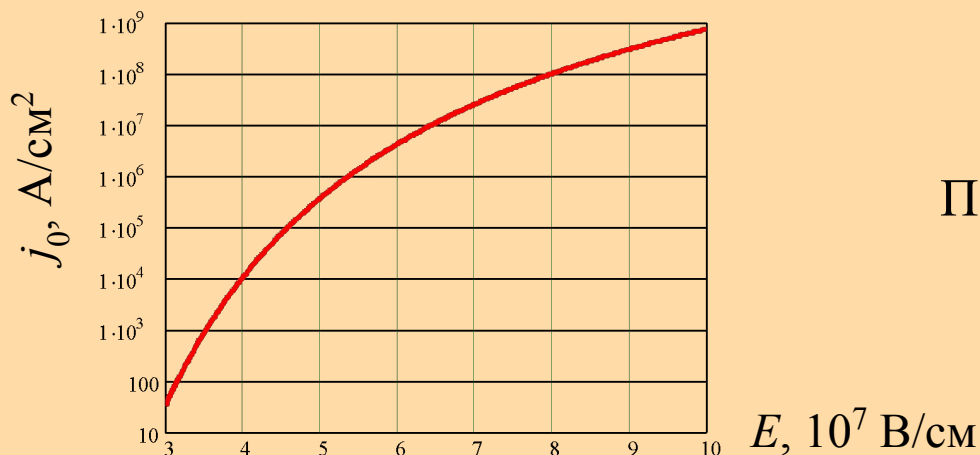
где  $m_e$  - масса электрона,  $\phi$  – потенциал работы выхода  $e\phi$  металла,  $t$  и  $\mathcal{G}$  - табулированные функции аргумента  $y = e \sqrt{eE} / \phi$

Если положить  $t^2(y) = 1,1$   $\vartheta(y) = 0,95 - 1,03y^2$  и подставить значения констант, то получим приближенную формулу, достаточную для практических расчетов

$$j = 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left[ -6,83 \cdot 10^7 \frac{\phi^{3/2}}{E} \vartheta(y) \right]$$

$j$  в А/см<sup>2</sup>,  $E$  в В/см и  $\phi$  в В.

Зависимость плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля для вольфрама ( $\phi = 4,5$  В).



$$j \ 10^8 - 10^9 \text{ А/см}^2$$

при  $E = 80 - 100$  МВ/см.

Подобные напряженности поля получают используя острия с радиусом закругления

20-50 Å.

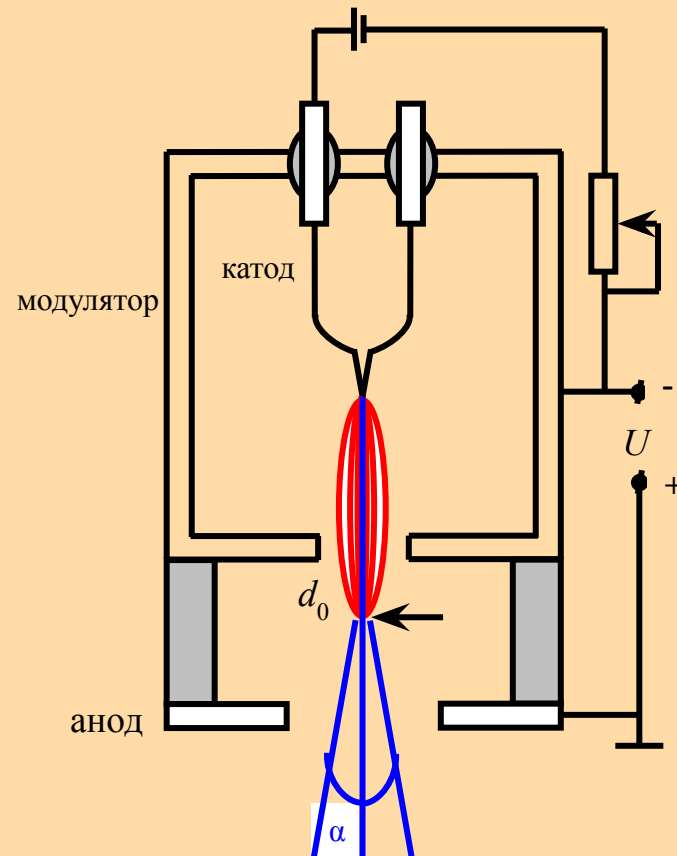
Автоэлектронные эмиттеры могут работать

- при комнатной температуре;
- при температуре немного меньшей, чем температура начала термоэлектронной эмиссии (1600-1800 К).

В первом случае энергетический разброс электронов не превышает 0,3-0,5 эВ, во втором случае 0,6-0,8 эВ.

Однако при эксплуатации автоэлектронного эмиттера при комнатной температуре на его поверхности появляются загрязнения в виде адсорбатов остаточных газов, которые генерируют шум электронной эмиссии и вызывают ее нестабильность. Поэтому периодически подобные эмиттеры требуют прогрев (т.н. процедура вспышки).

## Принципиальная схема электронной пушки



**Электронная пушка состоит из следующих основных узлов:**

1. Электронный эмиттер (катод).

2. Управляющий электрод  $\equiv$  модулятор  $\equiv$  электрод Венельта.

**Анод с последующей системой фокусирующих электродов.**

Испущенные катодом электроны ускоряются к заземленному аноду разностью потенциалов  $U$ , которая определяет энергию электронов  $eU$ .

Между катодом и анодом располагается управляющий электрод (модулятор), ось которого совпадает с острием катода. Модулятор находится под большим отрицательным потенциалом (от 0 до  $\sim 500$  В) чем катод за счет падения напряжения на регулирующем резисторе (электрическая цепь катод – заземленный положительный полюс высоковольтного выпрямителя замыкается потоком электронов, испускаемых катодом).

Подобное расположение катода, модулятора и анода приводит к тому, что испущенные катодом электроны фокусируются за модулятором в пятно минимального диаметра  $d_0$ . Плоскость с этим пятном называется плоскостью кроссовера или просто кроссовером. Из кроссовера электронный пучок выходит с угловой расходимостью  $\alpha \leq 10^{-3}$  радиан.

Максимальная плотность электронного тока в кроссовере  $j_3$  (не путать с  $j_0$ ) определяется выражением

$$j_3 = 4I_3 / 4\pi d_0^2$$

Если бы последующие электронные линзы не имели аббераций, то плотность тока на образце была бы равна  $j_3$ .

Используемые в различных методах анализа **электронные пушки с термоэмиттерами имеют значения  $j_3$  до десятков  $\text{A}/\text{cm}^2$  при диаметре кроссовера сотни нм. У электронных пушек с автоэлектронными эмиттерами  $j_3$  те же десятки  $\text{A}/\text{cm}^2$ , но  $d_0$  десятки нм.**

**Абсолютные значения тока  $I_3$   $10^{-2}$ - $10^{-3}$  мкА.**

Яркость электронной пушки, которая определяется как плотность тока в единицу телесного угла. Так как  $\alpha$  - малый угол, то телесный угол охватывающий расходящийся пучок есть  $\pi\alpha^2$ , поэтому

**яркость электронной пушки**

$$\beta = j_3 / \pi\alpha^2$$

**Зависимости  $I_3$  и  $\beta$  от напряжения смещения, равного разности потенциалов между катодом и модулятором**

При малой величине  $U_{см}$  фокусирующее действие модулятора слабо и на электроны действует только ускоряющее поле анода, поэтому  $I_3$  велико. Поскольку фокусировка слабая, то в кроссовере  $\alpha$  велико и, соответственно,  $\beta$  мало.

При увеличении напряжения смещения часть электронов тормозится и заворачивается к катоду, при этом  $I_3$  падает. Яркость вначале растет за счет уменьшения  $\alpha$ , более быстрого, чем падение  $I_3$ , затем  $\beta$  падает ( $I_3$  становится совсем малым).

