

## 1.8. ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ

**Цель лекции:** изучение основных характеристик электронных потоков, методов их формирования и физических явлений, позволяющих получать эти потоки.

### 1.8.1. ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ

В приборостроении и в электронных технологиях в качестве «инструмента» используются острорасфокусированные электронные, ионные, атомарные, оптические, рентгеновские пучки, газоразрядная плазма, а также мощные электрические и магнитные поля, благодаря которым функционируют сами приборы, и с помощью которых обрабатывают изделия и измеряют их размеры, контролируют свойства и диагностируют параметры, управляют технологическими процессом и оборудованием.

Параметры пучков, характерные как для приборов, так и для электронных, ионных и плазменных технологических процессов приведены в табл. 1.3. Для фотонов с энергиями 1,6...3,5 эВ, соответствующими видимому свету, минимальный размер обработки составляет приблизительно 1 мкм, а в области ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения (энергия фотонов находится в диапазоне 5...1000 эВ) размер обработки можно уменьшить до 0,1 мкм.

Таблица 1.3

Характеристики пучков атомных частиц

Тип пучка	Длина волны, нм	Энергия, эВ	Минимальный размер, нм	Удельная мощность, Вт/см <sup>2</sup>
Оптический	200–400	1,6–3,5	1000	$10^{-2}$ – $10^{10}$
Рентгеновский	0,2–2,0	5–1000	100	$10^{-3}$ –1
Электронный	0,01	$10^2$ – $10^5$	10	$10^{-2}$ – $10^{10}$
Ионный	0,001	$10^2$ – $10^7$	1	$10^{-4}$ – $10^5$
Атомарный	0,001	$0,1$ – $10^{4*}$	1*	$10^{-6}$ – $10^{2*}$

\* Максимальные значения энергии и плотности мощности атомарного пучка, а также минимальный размер обработки относятся к ионному пучку с нейтрализованным зарядом.

В обычно используемом диапазоне энергий электронов 0,1...100 кэВ можно получить разрешение, сравнимое с размерами атомов — порядка 0,1 нм. Ограничения на минимальный размер пучка электронов (порядка 10 нм)

связаны с их рассеянием. Ионные и атомарные пучки характеризуются отсутствием ограничений на дебройлевскую длину волны даже при малых энергиях ионов. Доля рассеянных ионов обычно очень мала, так как их размеры соизмеримы с периодом кристаллических решеток материалов, с которыми они взаимодействуют. Минимальный размер пучка ионов или атомов может достигать примерно 1 нм.

Для формирования потоков частиц и управления этими потоками, например при электронно-лучевой обработке, формирующие, ускоряющие, фокусирующие и отклоняющие электроды выполняют как единый блок — электронно-оптическую систему (ЭОС).

Основой для формирования потока электронов является процесс электронной эмиссии — испускания электронов поверхностью твердого тела или жидкости. Для перехода из твердого тела в вакуум электрон должен преодолеть потенциальный барьер, — совершить работу выхода. Эмиссия присутствует всегда, поскольку всегда имеются электроны с энергией, превосходящей работу выхода. Однако в нормальных условиях их относительно мало. Для того чтобы процесс эмиссии стал заметным и постоянным, необходимо наличие внешнего электрического поля, обеспечивающего отвод электронов и сообщение телу дополнительной энергии для повышения энергии электронов.

В зависимости от того, каким образом сообщается телу энергия, различают механизмы эмиссии:

- термоэлектронная;
- фотоэлектронная;
- автоэлектронная;
- вторичная электронная;
- ионно-электронная;
- горячих электронов;
- взрывная эмиссия.

В электронике тела, используемые в качестве эмиттеров, называются катодами: термокатадами, фотокатодами, автокатадами и т. д.

Формирование потоков электронов осуществляется с помощью электронных пушек (рис. 1.28). Пушка состоит из источника электронов (эмиттера) и двух или более электродов, находящихся под различными электрическими потенциалами. Обычно заземленный анод разгоняет электроны до конечной скорости при движении от катода, находящегося под отрицательным потенциалом, соответствующим требуемой энергии носителей заряда. Может быть и наоборот: катод заземлен, а на анод подается положительный потенциал 10...100 кВ. Назначением электрода Венельта, потенциал которого близок к потенциалу эмиттера, является придание силовым линиям (особенно у заостренного конца эмиттера) такой формы, чтобы обеспечить требуемую интенсивность электрического поля и направление движения электронного пучка.

Важнейшей характеристикой источника электронов является его яркость:

$$\beta = I / (\Omega S), \quad (1.1)$$

где  $I$  — ток эмиссии;  $\Omega$  — телесный угол, в который происходит эмиссия;  $S$  — площадь эмитирующей поверхности.

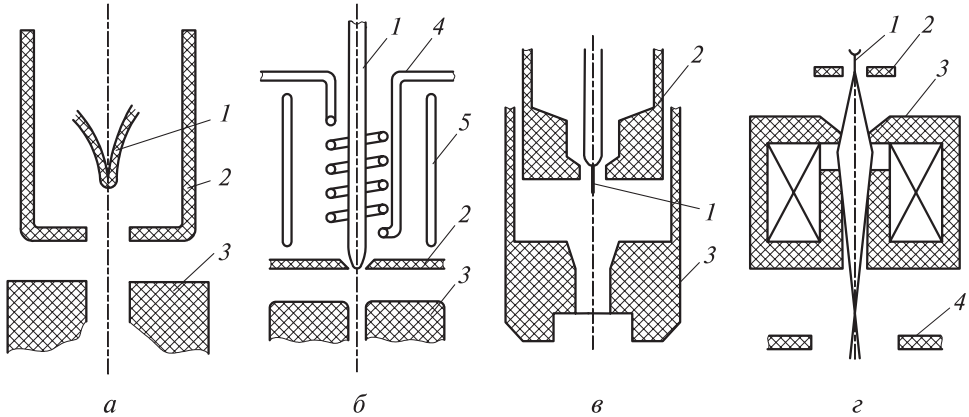


Рис. 1.28. Схемы электронных пушек:

*а* — с термоэмиссионным катодом из вольфрамовой проволоки; *б* — типа Броера с катодом из гексаборида лантана с косвенным подогревом; *в* — автоэмиссионный источник с электростатической фокусирующей системой; *г* — автоэмиссионный источник с магнитной линзой и двумя анодами; 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 — анод; 4 — нить подогрева; 5 — экран; б — второй анод

## 1.8.2. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

*Термоэлектронная эмиссия* — это процесс испускания электронов нагретой поверхностью. Эффект протекания тока в вакууме между отрицательным нагретым и положительным электродами был открыт в 1884 г. Эдисоном и объяснен в 1887 г. Томпсоном. Ток эмиссии возрастает с температурой тела до определенного значения — тока насыщения.

Чем выше температура (в разумных пределах) и чем ниже работа выхода материала, тем выше ток насыщения и тем эффективнее катод. Для использования эмиссии в практических целях необходимо иметь в простейшем случае пару электродов: отрицательный катод и положительный относительно электрода анод для создания разности потенциалов и ускорения электронов.

Плотность тока термоэмиссии можно рассчитать по формуле Ричардсона — Дэшмана:

$$j_0 = AT^2(1-r)\exp\left[-\frac{e}{kT}(\phi - \sqrt{eE})\right], \quad (1.2)$$

где  $A$  — константа Ричардсона,  $A = 120 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \text{К}^{-2}$ ;  $T$  — температура эмиттера, К;  $r$  — коэффициент отражения от потенциального барьера;  $e$  — заряд электрона;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\phi$  — работа выхода электрона;  $E$  — напряженность электрического поля, В/м.

Для придания электронному пучку необходимой энергии (скорости) и формы служат формирующие и апертурные диафрагмы, фокусирующие и отклоняющие линзы, стигматоры, сканирующие системы и другие элементы ЭОС.

### 1.8.3. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

*Фотоэлектронная эмиссия* или внешний фотоэффект — это процесс испускания электронов твердыми телами и жидкостями под действием электромагнитного излучения (фотонов). Герц заметил, что облучение ультрафиолетовым светом двух электродов под напряжением облегчает проскакивание разряда между ними. Фотоэмиссию в 1887 г. открыл Герц, а Ленард и Томпсон в 1898 г. показали, что это именно испускание электронов.

Для фотоэмиссии характерны следующие закономерности:

- количество испускаемых фотоэлектронов пропорционально интенсивности излучения;

- для каждого материала существует пороговая частота, так называемая «красная граница фотоэффекта», т. е. такая частота излучения (максимальная длина волны), меньше (больше) которой испускание электронов не происходит;

- кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты излучения и не зависит от его интенсивности.

Сущность фотоэмиссии состоит в следующем: фотон излучения передает свою энергию свободным электронам, фотоэлектрон перемещается к поверхности и выходит в вакуум. Для этого энергия электрона должна быть выше работы выхода материала, которая для щелочноземельных металлов более 2 эВ, а для других — более 3 эВ.

Вследствие специфики процесса и малых значений токов фотокатоды практически не используются в качестве электронных пушек. Основными объектами являются различные полупроводниковые и электровакуумные приборы: фотодиоды, электронно-оптические преобразователи (ЭОП), фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

### 1.8.4. АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

*Автоэлектронная эмиссия* (полевая, электростатическая, туннельная) — процесс испускания электронов проводящими твердыми и жидкими телами под действием внешнего электрического поля высокой напряженности.

Автоэлектронную эмиссию открыл в 1897 г. Р. Вуд. При исследовании вакуумного разряда Вуд заметил в сильном электрическом поле испускание электронов, наблюдая свечение стекла под их воздействием, и описал это явление.

Автоэлектронная эмиссия объясняется туннельным эффектом и происходит без затрат энергии на возбуждение электронов, необходимых для электронной эмиссии иных видов. При автоэлектронной эмиссии электроны преодолевают потенциальный барьер на границе эмиттера не путем прохода над ним за счет кинетической энергии теплового движения, как при термоэлектронной эмиссии, а путем туннельного просачивания сквозь барьер, суженный и сниженный электрическим полем.

Зависимость автоэлектронной эмиссии от электрического поля и работы выхода значительная (табл. 1.4).

Автоэлектронная эмиссия зависит от двух основных параметров автоэлектронного катода:

- работы выхода;
- напряженности электрического поля на поверхности автоэлектронного катода.

Таблица 1.4

Зависимость автоэлектронной эмиссии, А/см<sup>2</sup>, от поля и работы выхода

Поле, В/см	Работа выхода, эВ		
	2,0	4,5	6,3
10 <sup>7</sup>	10 <sup>3</sup>	2 · 10 <sup>-17</sup>	—
2 · 10 <sup>7</sup>	2,5 · 10 <sup>7</sup>	5 · 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-13</sup>
5 · 10 <sup>7</sup>	—	4 · 10 <sup>6</sup>	2 · 10 <sup>-2</sup>
10 <sup>8</sup>	—	6 · 10 <sup>8</sup>	5 · 10 <sup>6</sup>

Плотность тока автоэлектронной эмиссии определяется законом Фаулера — Нордгейма:

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\phi} \exp \left( - \frac{6,85 \cdot 10^7 \cdot \phi^{\frac{3}{2}}}{E} \cdot \theta \left( 3,62 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{E}}{\phi} \right) \right), \quad (1.3)$$

где  $E$  — напряженность электрического поля у поверхности эмиттера, В/см;  $\phi$  — работа выхода, эВ;  $\theta(y)$  — табулированная функция Нордгейма.

## Тесты к лекции 8

### 1. Термоэлектронная эмиссия возникает в катоде при его:

- а) нагреве;
- б) облучении фотонами;
- в) бомбардировке высокоэнергетичными электронами.

### 2. Фотозлектронная эмиссия возникает в катоде при его:

- а) облучении фотонами;
- б) бомбардировке ионами рабочего газа;
- в) нагреве.

### 3. Автоэлектронная эмиссия возникает в катоде при его:

- а) нахождения в электрическом поле высокой напряженности;
- б) бомбардировке высокоэнергетичными электронами;
- в) бомбардировке ионами рабочего газа.