

Лекция 4

Тема Лекции:
Ток термоэлектронной эмиссии

к.ф.-м.н., PhD, ассоциированный профессор
Тулегенова Аида Тулегенкызы

Цель лекции:

Изучить физическую природу термоэлектронной эмиссии, условия вылета электронов из металла в вакуум при нагревании, основные уравнения и зависимости, описывающие эмиссионные токи, а также рассмотреть практическое применение явления в вакуумной электронике и термоэмиссионных приборах

Основные вопросы:

1. Понятие термоэлектронной эмиссии.
2. Энергетическое распределение электронов в металле.
3. Уравнение Ричардсона–Дэшмана
4. Факторы, влияющие на величину термоэлектронного тока.
5. Практическое применение термоэлектронной эмиссии

Рассчитаем ток эмиссии электронов с поверхности полупроводника в условиях термодинамического равновесия. Все свободные электроны в полупроводнике находятся в потенциальной яме. Функция распределения этих электронов по степеням свободы описывается больцмановской статистикой:

$$f_0(E,T) = e^{-\frac{E-F}{kT}}$$

Ток, обусловленный этими электронами, называется током термоэлектронной эмиссии. Таким образом, *ток термоэлектронной эмиссии* – это ток, обусловленный горячими равновесными электронами вследствие распределения энергии по степеням свободы

Чтобы узнать число электронов *dn*, нужно число состояний *dz* умножить на вероятность их заполнения *f*(*E*,*T*):

$$dn = f\left(E,T\right)dz$$

***Функция распределения электронов по состояниям для электронов и дырок – в общем случае функция Ферми – Дирака*. Однако поскольку рассматриваются электроны с большой энергией, способные покинуть поверхность полупроводника (*E* – *F* >> *kT*), то функция распределения с высокой степенью вероятности будет больцмановской:**

$$f_0\left(E,T\right) = \frac{1}{e^{\frac{E-F}{kT}} - 1} \approx e^{-\frac{E-F}{kT}}$$

Термодинамическая работа выхода в полупроводниках p и n типов

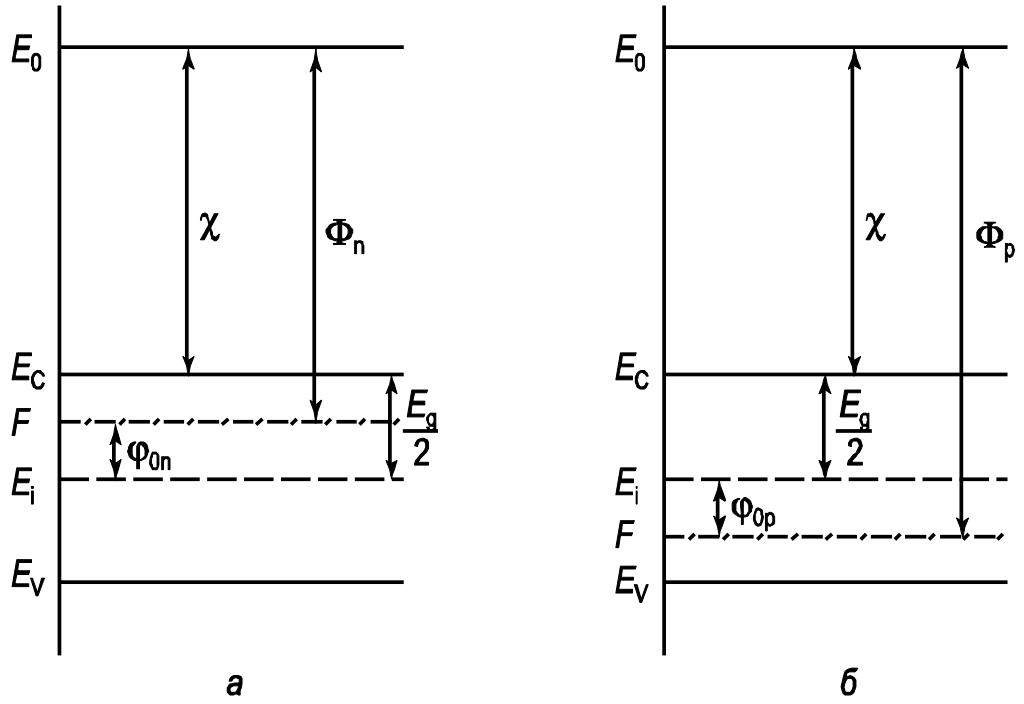


Рис. 1. - Зонная диаграмма полупроводников: а) *n*-типа; б) *p*-типа

Согласно определению термодинамической работы выхода, получаем следующее выражение для термодинамической работы выхода в полупроводниках n типа Фn и p типа Фp:

$$\hat{O}_{\mathrm{n}} = -F = \chi + \left(\frac{E_{\mathrm{g}}}{2} - \varphi_{\mathrm{n}} \right)$$

$$\hat{O}_{\mathrm{p}} = -F = \chi + \left(\frac{E_{\mathrm{g}}}{2} + \varphi_{\mathrm{p}} \right)$$

Эффект поля, зонная диаграмма при эффекте поля

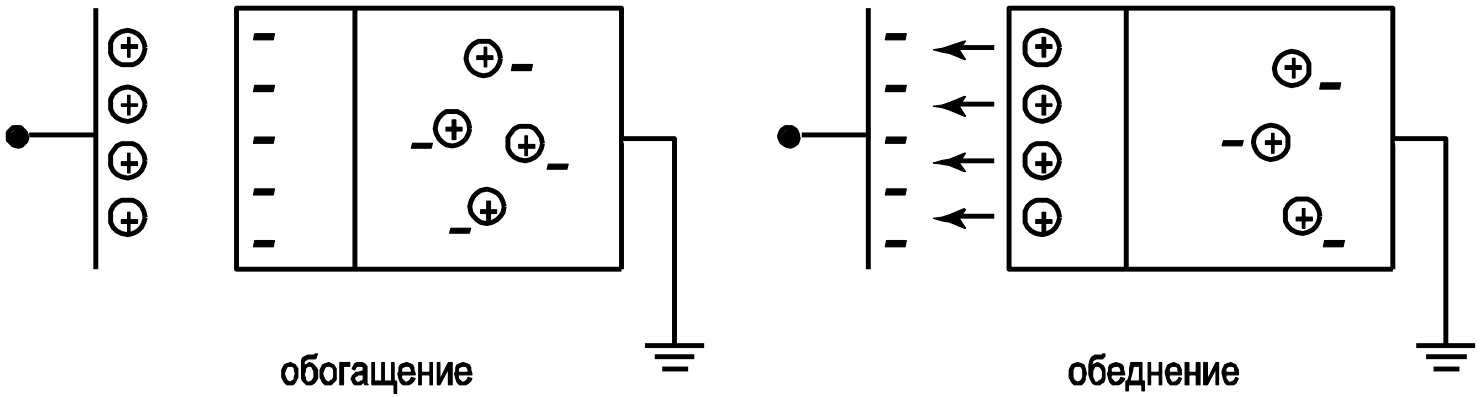
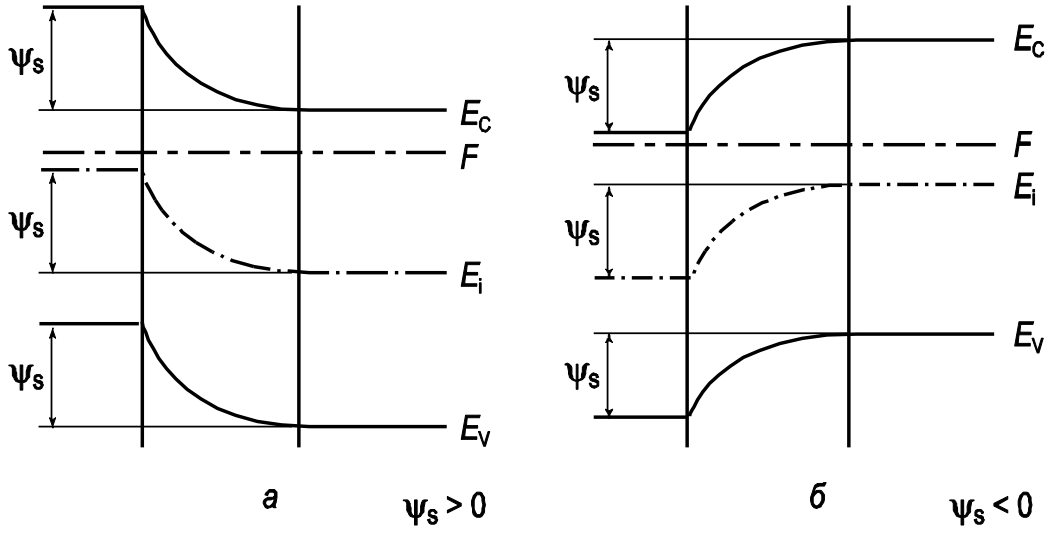


Рис. 2. - Изменение концентрации свободных носителей в приповерхностной области полупроводника при наличии вблизи поверхности заряженной металлической плоскости

Значение электростатического потенциала на поверхности полупроводника называется *поверхностным потенциалом* и обозначается символом ψ_s.

Знак поверхностного потенциала ψ_s соответствует знаку заряда на металлическом электроде, вызывающего изгиб энергетических зон.

При $\psi_s > 0$ *зоны изогнуты вниз, при* $\psi_s < 0$ *зоны изогнуты вверх*



Энергетические зоны на поверхности полупроводника *n*-типа:

***а*) в случае обеднения; *б*) в случае обогащения**

Выводы лекции: В ходе лекции рассмотрена физическая природа термоэлектронной эмиссии — испускания электронов нагретым металлом в вакуум. Установлено, что электроны в металле распределены по энергиям по закону Ферми–Дирака. При комнатной температуре почти ни один электрон не может преодолеть потенциальный барьер на поверхности, высота которого равна работе выхода φ. При нагревании «хвост» распределения смещается в область высоких энергий, и часть электронов получает энергию, достаточную для вылета. Плотность тока насыщения описывается уравнением Ричардсона–Дэшмана: $j = A \cdot T^2 \cdot \exp(-\varphi/kT)$, где $A \approx 1{,}2 \cdot 10^6$ А/(м²·К²). Из уравнения следует, что ток определяется в основном температурой катода и работой выхода. Из-за экспоненциальной зависимости уменьшение φ всего на десятые доли электронвольта увеличивает ток на порядки.

Показано, что на величину термоэлектронного тока влияют также внешнее электрическое поле, пространственный заряд и состояние поверхности катода. Внешнее поле понижает потенциальный барьер (эффект Шоттки). Пространственный заряд при малых анодных напряжениях ограничивает ток законом «трёх вторых» ($j \propto U^{3/2}$). Состояние поверхности катода включает адсорбированные плёнки и покрытия. Именно поэтому на практике используют катоды с пониженной работой выхода: торированный вольфрам, LaB_6, оксидные катоды. Рассмотрено практическое применение явления:

-электронные пушки электронных микроскопов и установок электронно-лучевой литографии;

-рентгеновские трубки;

-электровакуумные лампы;

-магнетроны и клистроны;

-термоэмиссионные преобразователи, которые непосредственно преобразуют тепловую энергию в электрическую.

Вопросы для контроля изучаемого материала:

1. Что представляет собой явление термоэлектронной эмиссии?
2. Объясните физический смысл работы выхода электрона из металла.
3. Запишите и прокомментируйте уравнение Ричардсона–Дэшмана.
4. Какие параметры влияют на величину эмиссионного тока?
5. Чем отличаются оксидные катоды от металлических по эмиссионным свойствам?
6. Что такое режим, ограниченный пространственным зарядом, и как он описывается?
7. Где на практике используется термоэлектронная эмиссия?

Список литературных источников:

1. Трифонов Е. Н. Электронные процессы в твёрдых телах. — М.: Наука, 2015.
2. Соколов В. И. Физика и технология полупроводников. — М.: МИФИ, 2018.
3. Millman, J., Halkias, C. Electronic Devices and Circuits. — McGraw-Hill, 2010.
4. Streetman, B. G., Banerjee, S. Solid State Electronic Devices. — Prentice Hall, 2016.
5. Sze, S. M., Ng, K. K. Physics of Semiconductor Devices. — Wiley, 2007.
6. Boylestad, R., Nashelsky, L. Electronic Devices and Circuit Theory. — Pearson, 2019.
7. Sedra, A., Smith, K. Microelectronic Circuits. — Oxford University Press, 2015.