

# Контактные явления в полупроводниковой электронике

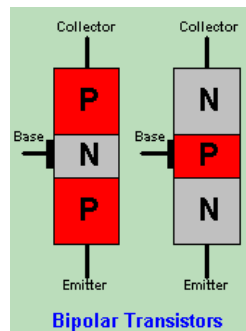
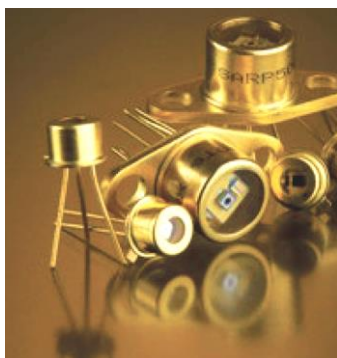
Сибирмовский Ю.Д., к.ф.-м.н., ассистент  
Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике НИЯУ МИФИ  
автор курса Гладков В.П., к.т.н., доцент ИНТЭЛ НИЯУ МИФИ

11 ноября 2020



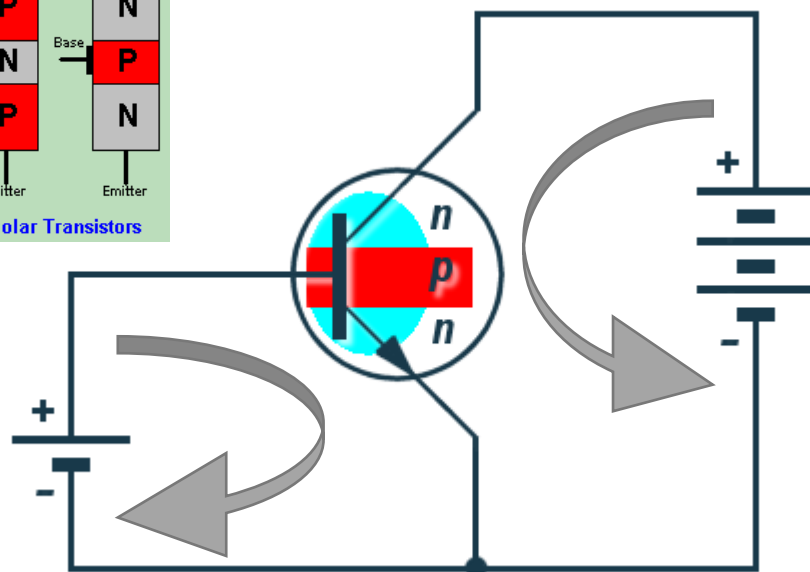
Точечный  
диод

Фотодиоды и  
светодиоды

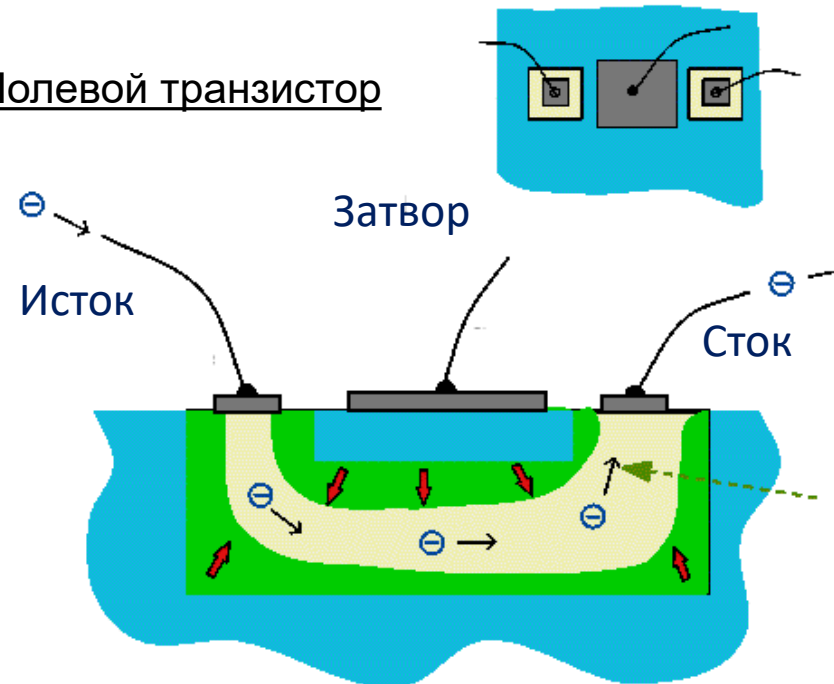


Bipolar Transistors

Биполярный транзистор

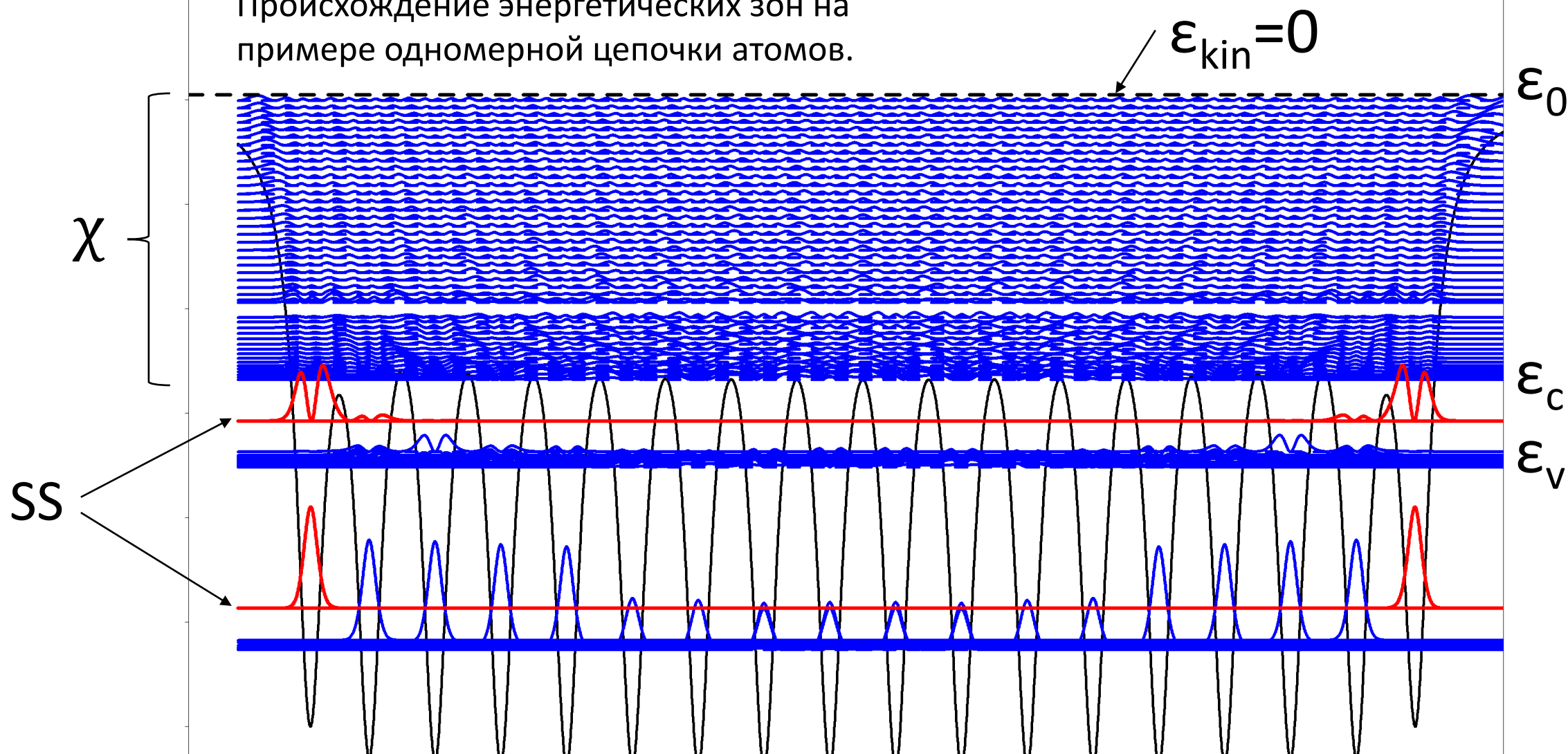


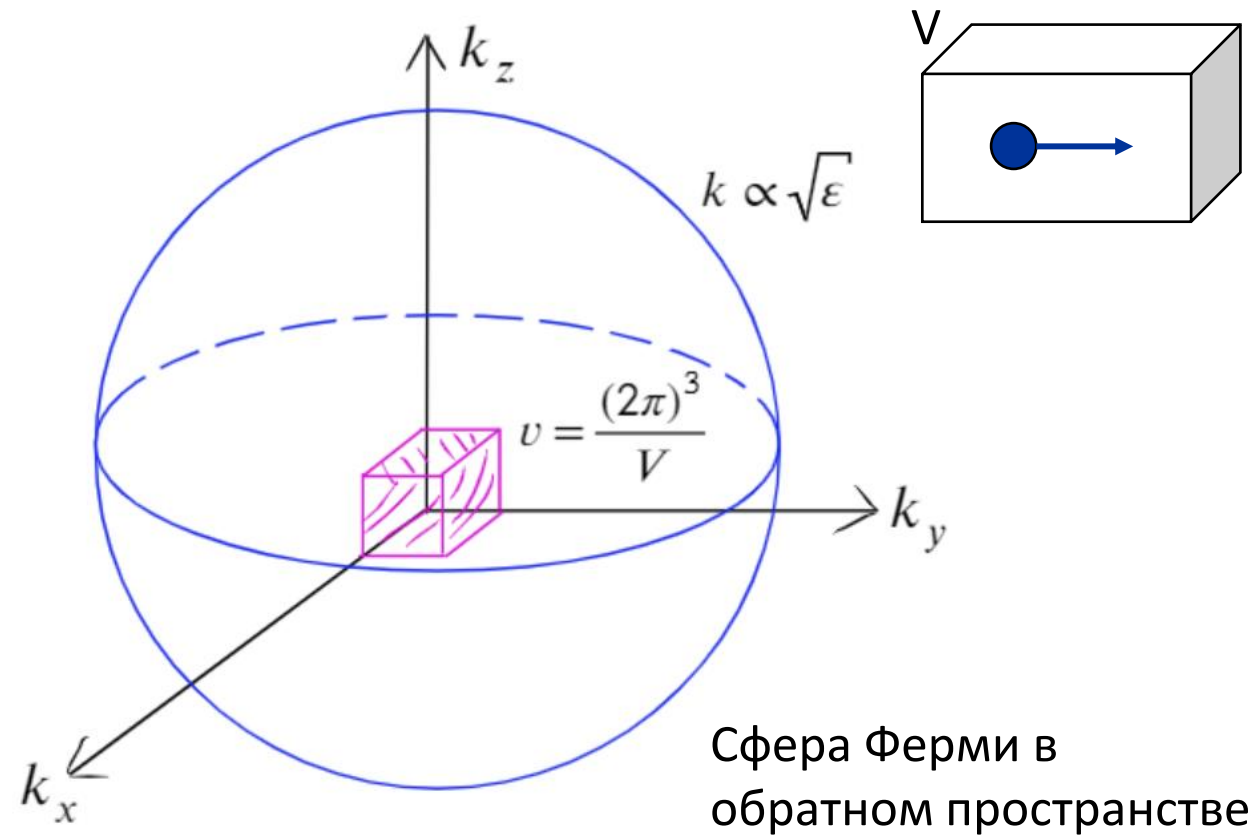
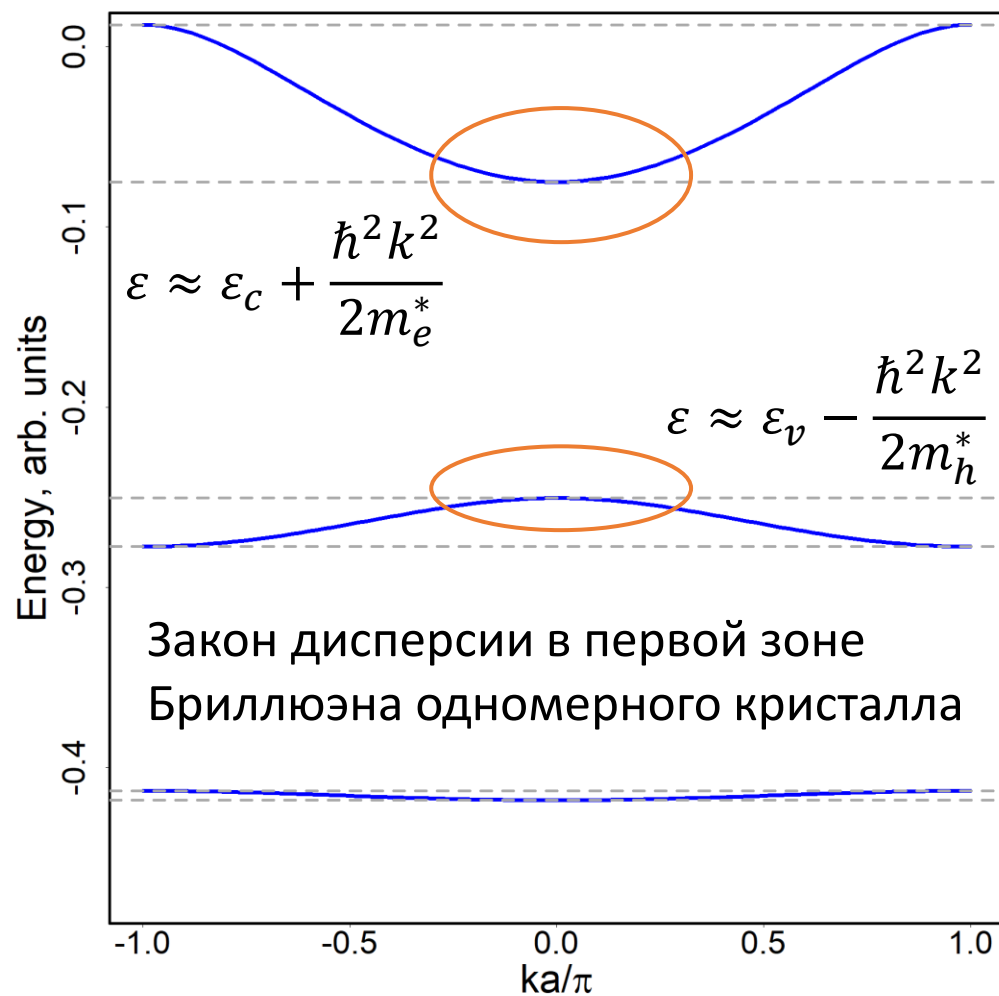
Полевой транзистор



1. Электроны в кристаллах. Энергетические зоны. Уровень вакуума. Электронное сродство. Поверхностные состояния.
2. Закон дисперсии и эффективная масса. Зоны Бриллюэна. Плотность состояний. Распределение Ферми.
3. Металлы и полупроводники. Электроны проводимости и дырки. Вырожденный и невырожденный электронный газ.
4. Легирование полупроводников. Основные и неосновные носители. Условие электронейтральности.
5. Диффузия и дрейф носителей заряда. Туннельный эффект. Самосогласованный потенциал.
6. Работа выхода. Термоэлектронная эмиссия.
7. Установление равновесия между двумя телами. Контактная разность потенциалов. Построение диаграмм контактов.
8. Контакт металл-диэлектрик-металл. Вольт-амперная характеристика. Учет туннелирования.
9. p-n переход. Туннельный диод.
10. Контакт металл-полупроводник. Барьер Шоттки. Омический контакт.
11. Гетеропереходы.

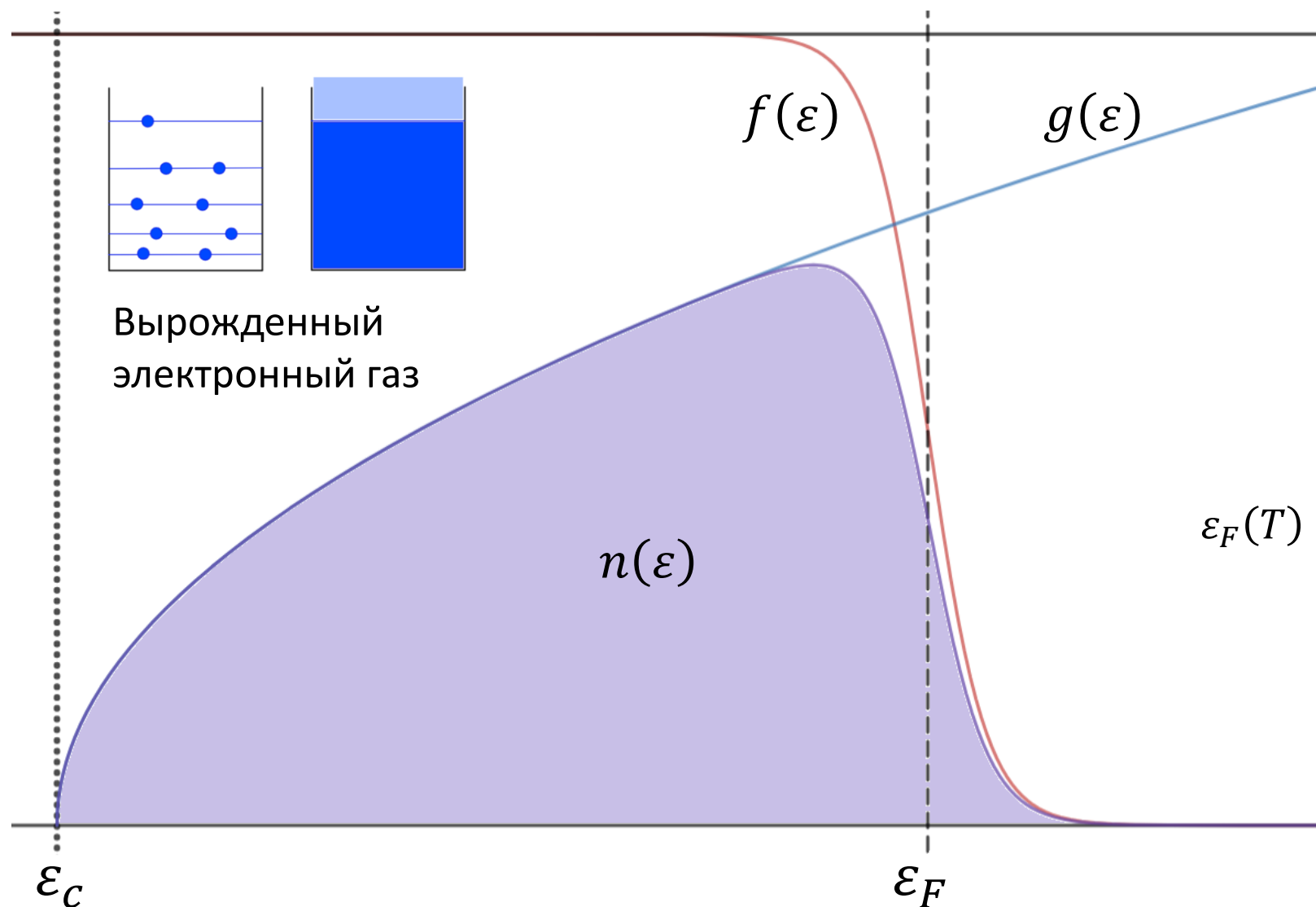
Происхождение энергетических зон на примере одномерной цепочки атомов.





Плотность состояний:

$$\frac{g_n(\varepsilon)}{V} = \frac{dN}{V d\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi^2} \left( \frac{m_e^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{\varepsilon - \varepsilon_c}$$

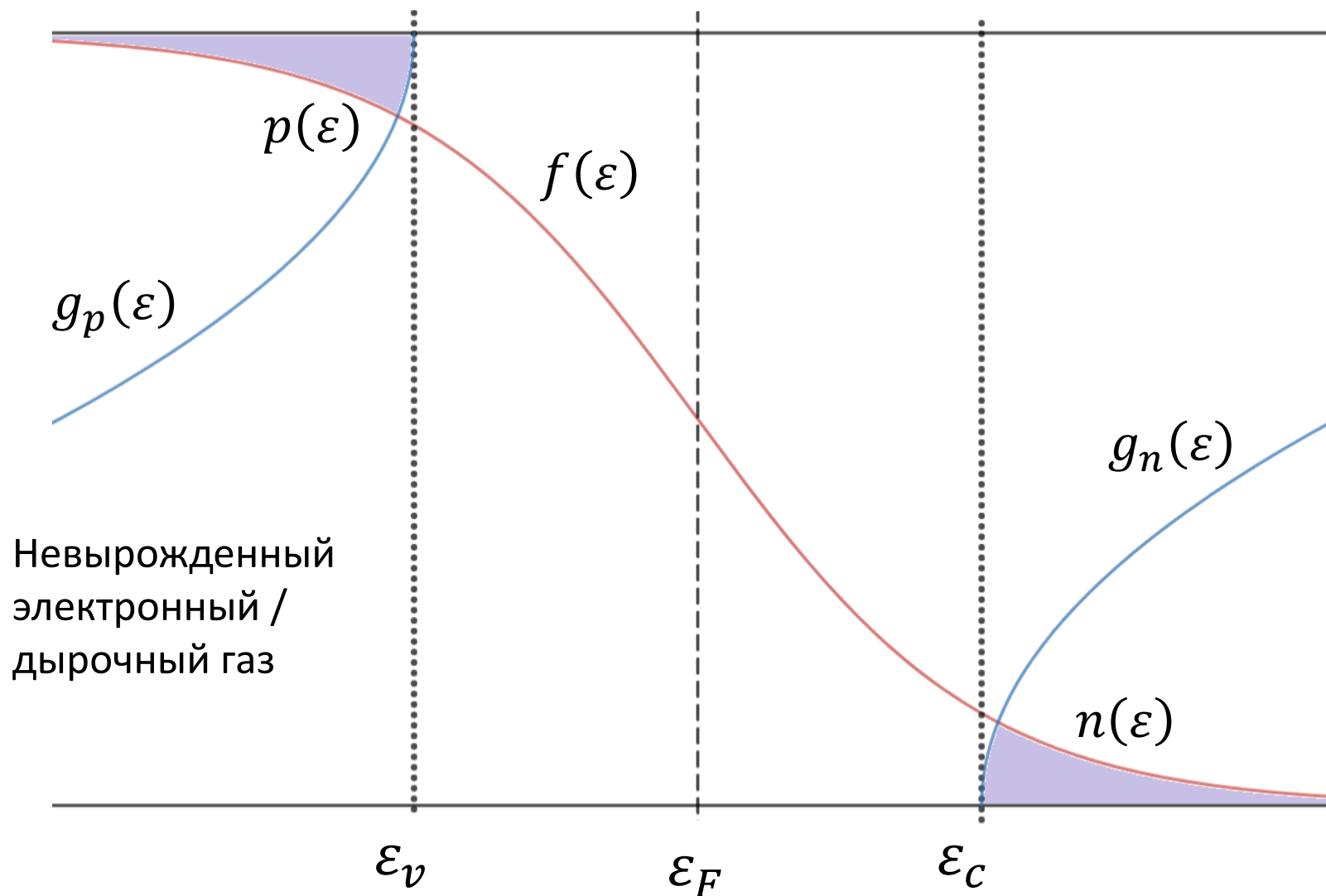


$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) + 1}$$

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}$$

$$\varepsilon_F(T) = \varepsilon_F(0) \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{\varepsilon_F(0)} \right)^2 + \dots \right]$$

$$v_F = \sqrt{2m\varepsilon_F}$$



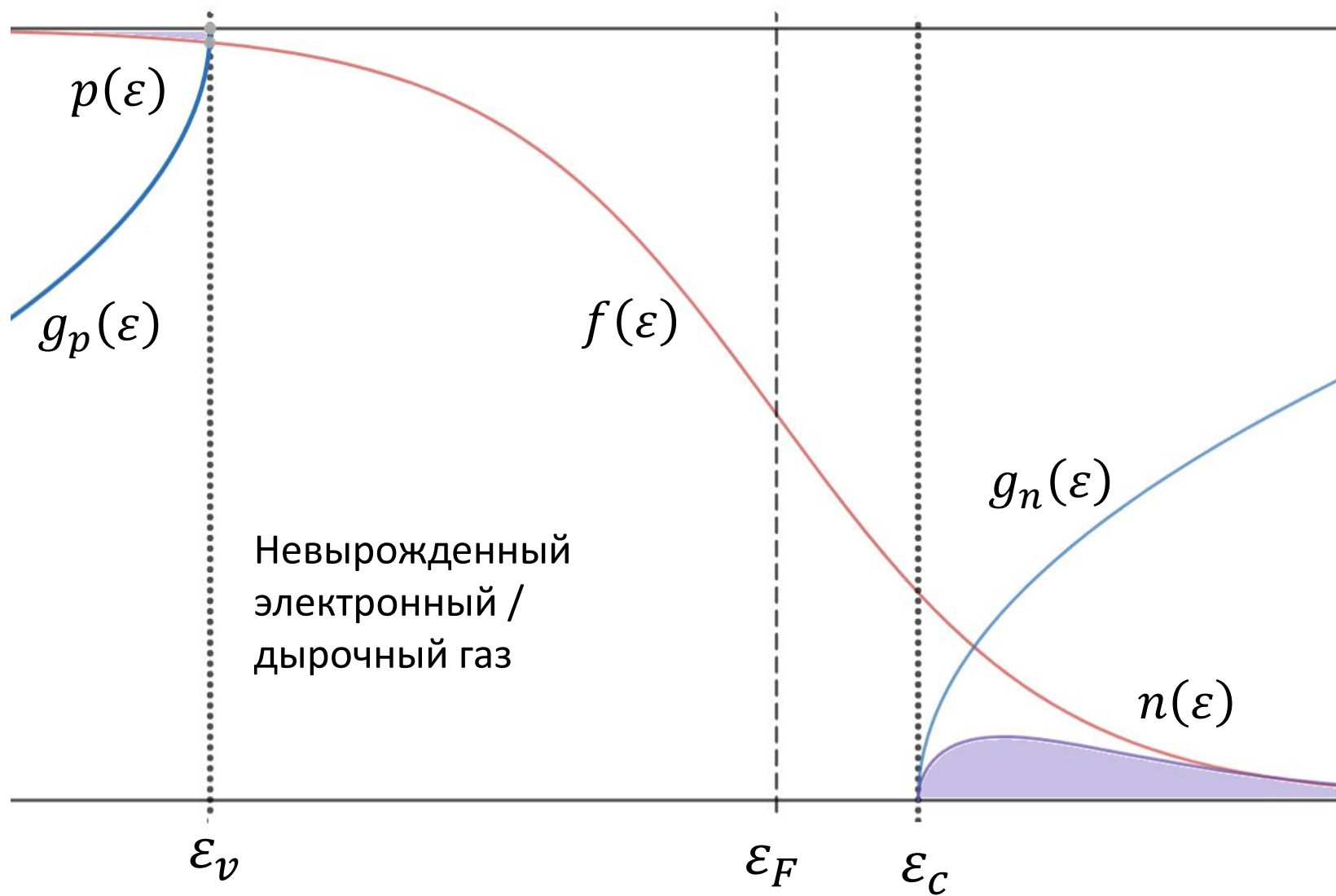
$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) + 1}$$

$$\varepsilon_F(T) = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_v}{2} + \frac{3}{4}kT \ln \frac{m_h^*}{m_e^*}$$

Условие  
электронейтральности:

$$n = p$$





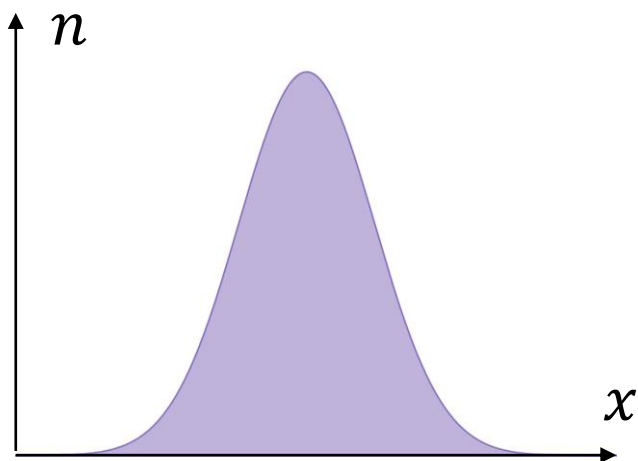
$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\exp\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}\right) + 1}$$

$$\varepsilon_F(T) \approx \varepsilon_c - kT \ln \frac{N_c}{N_D}$$

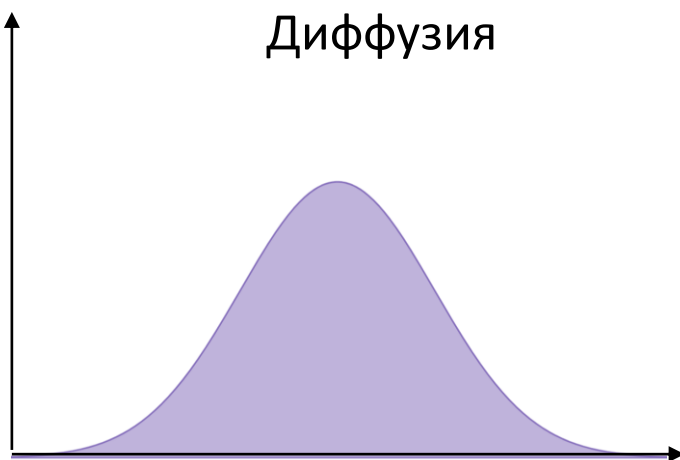
Условие  
электронейтральности:

$$n = N_D + p$$



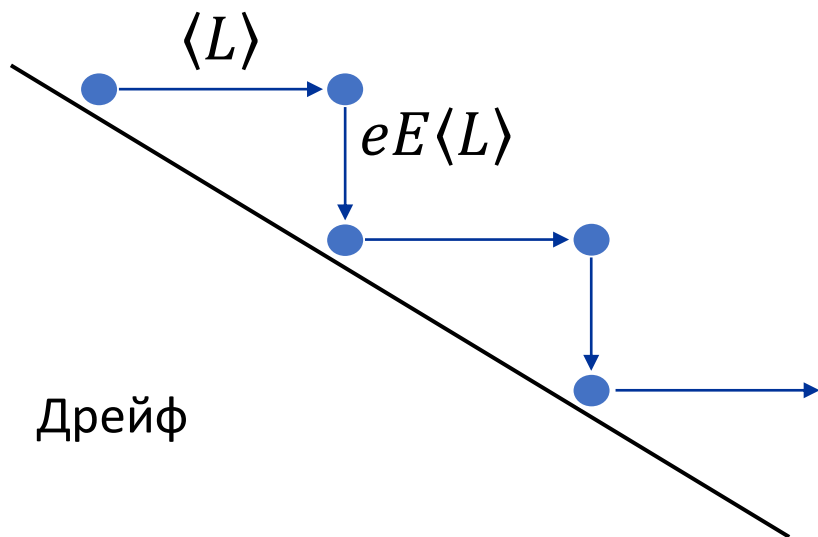
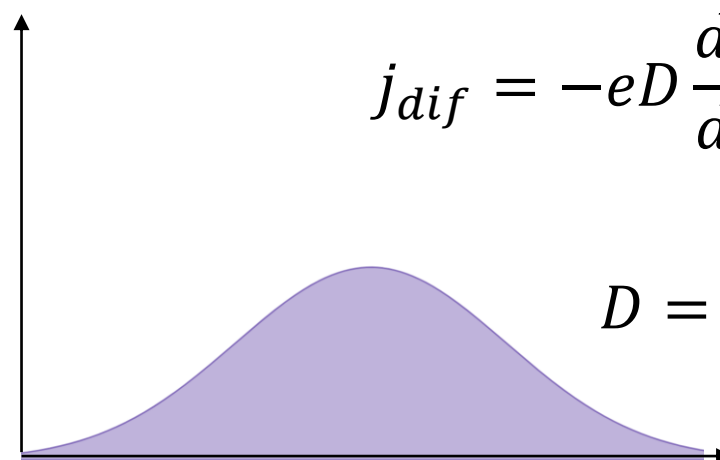


Диффузия



$$j_{dif} = -eD \frac{dn}{dx}$$

$$D = \frac{kT}{e} \mu$$

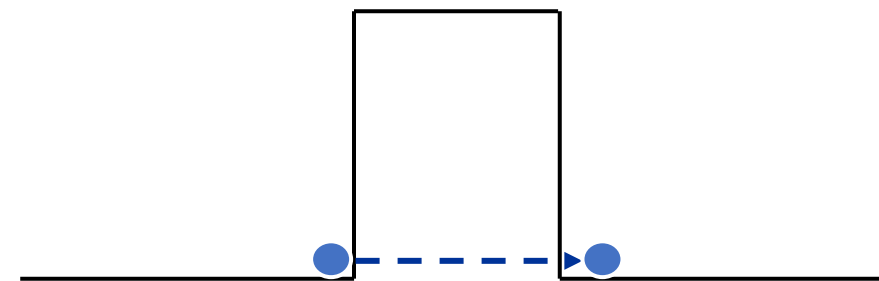


Дрейф

$$j_{dr} = en\mu E$$

$$\mu = \frac{e\langle L \rangle}{m^* v_T}$$

Туннелирование





Система уравнений  
диффузии-дрейфа

$$j = en\mu E - kT\mu \frac{dn}{dx} = 0$$

$$\begin{cases} \frac{dn}{dx} = \frac{e}{kT} (E + E_{ext})n \\ \frac{dE}{dx} = \frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon} (n - N_D) \end{cases}$$

Потенциал

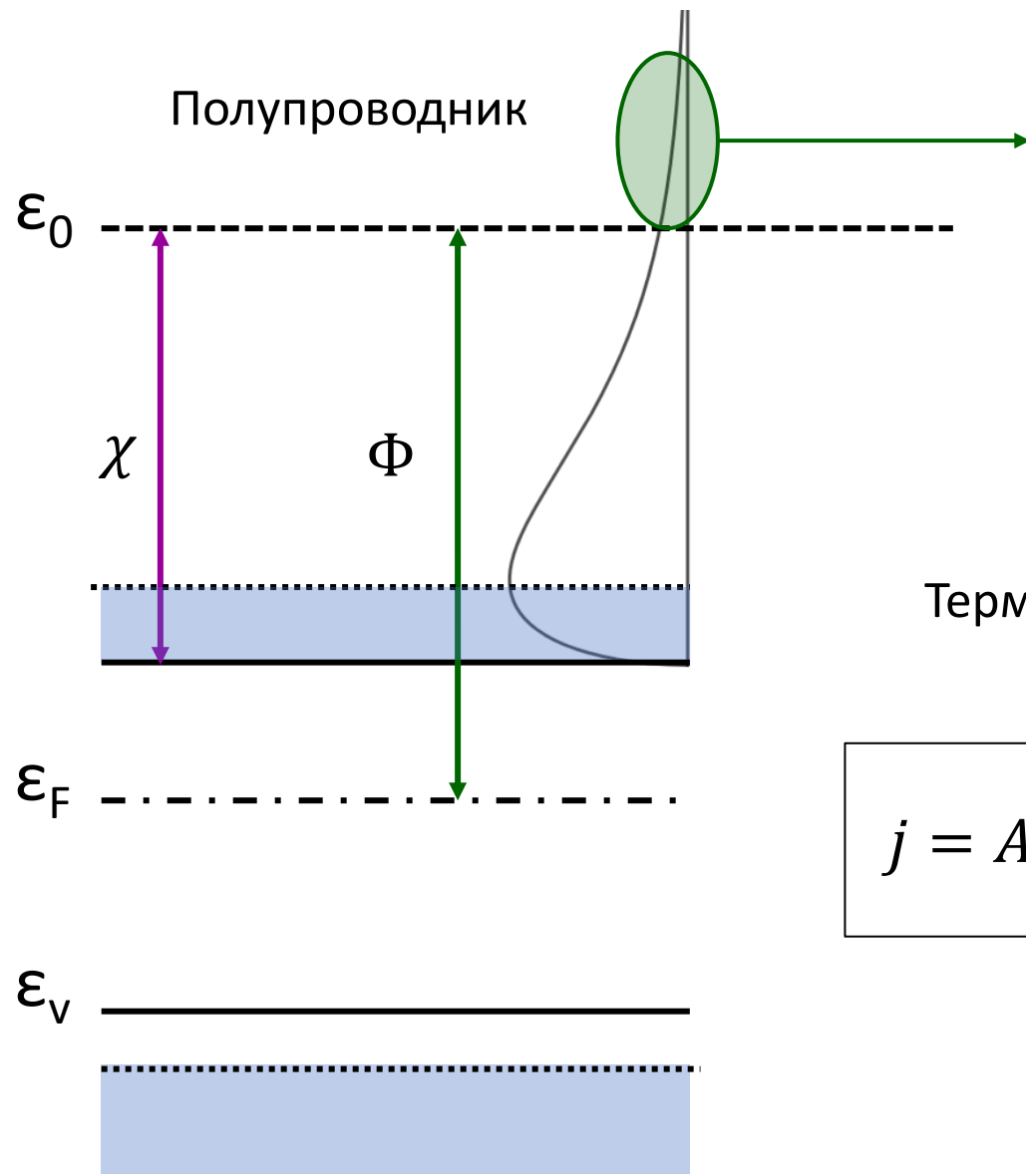
$$E + E_{ext} = -\frac{d\varphi}{dx}$$

Система уравнений  
Шредингера-Пуассона  
(двумерный  
электронный газ)

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2\psi}{dx^2} + (e\varphi + U)\psi = \varepsilon\psi \\ \frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon_0 \varepsilon} (n_s |\psi|^2 - N_D) \end{cases}$$

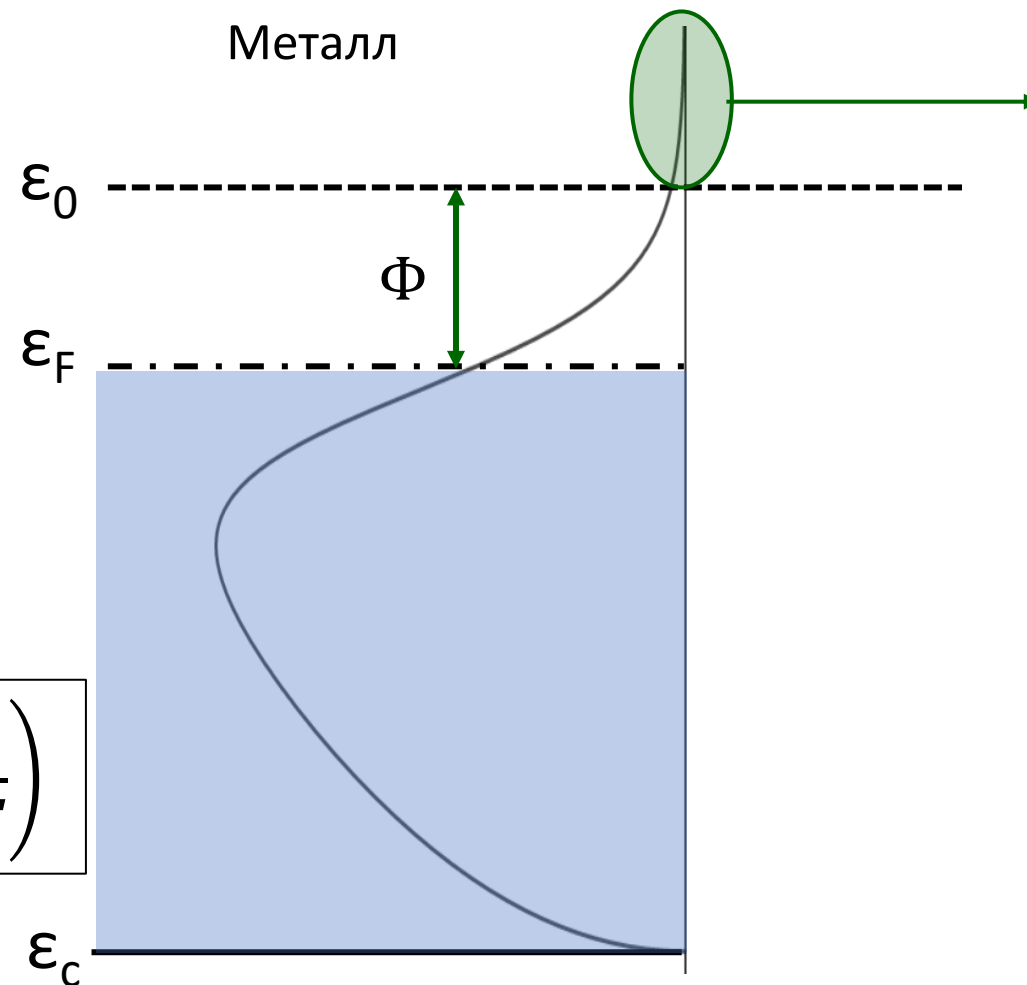
Нестационарные процессы –  
уравнение непрерывности.

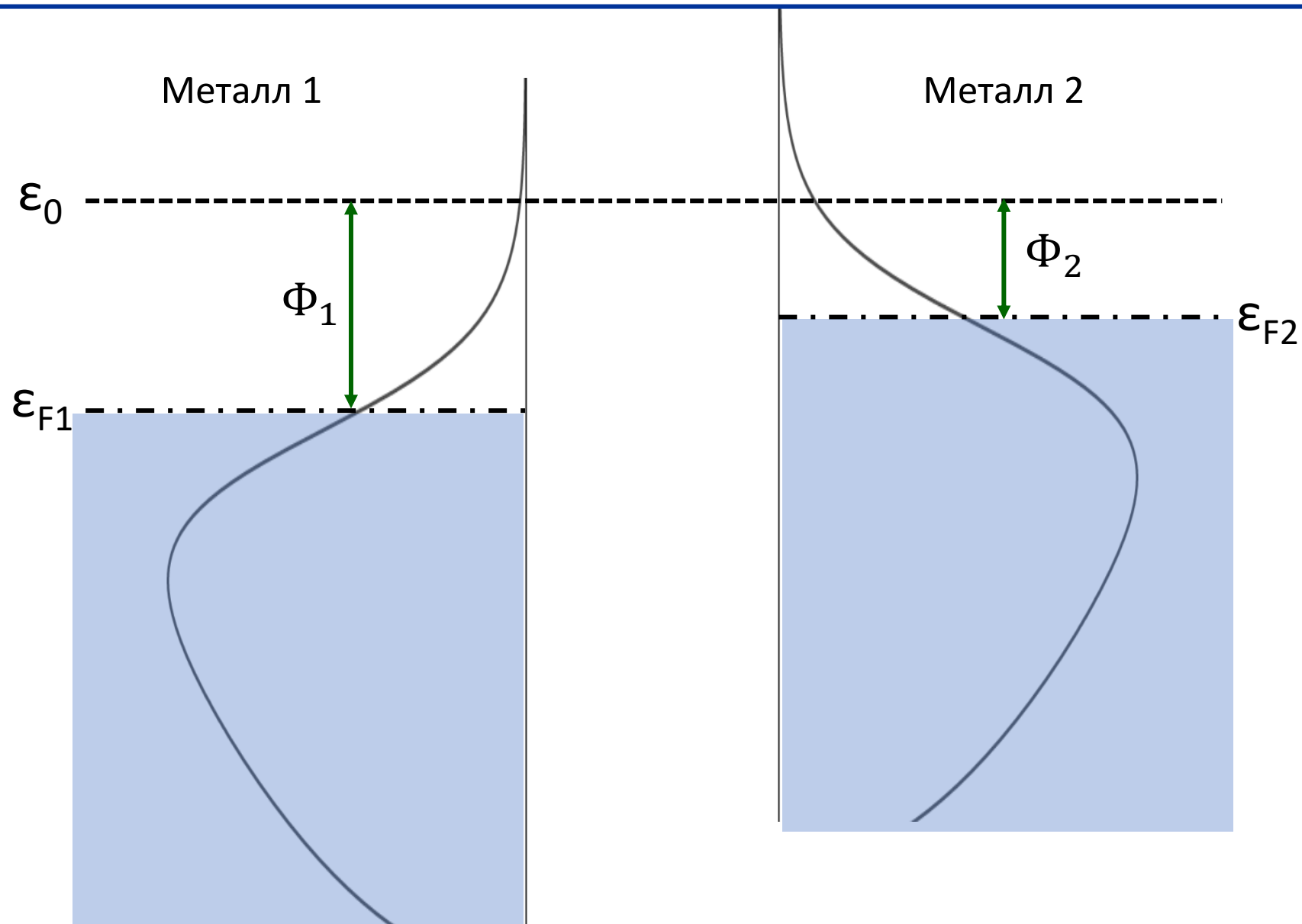
$$e \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial x} = e(G - R)$$

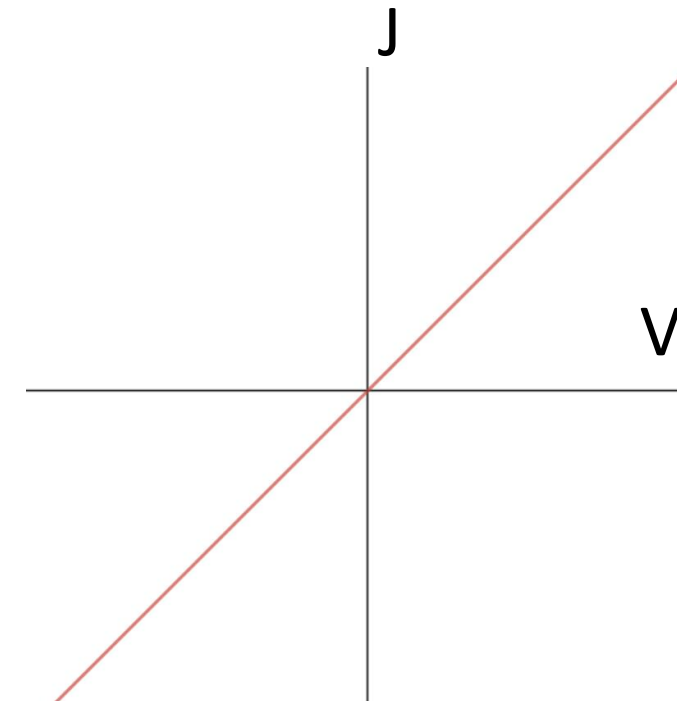
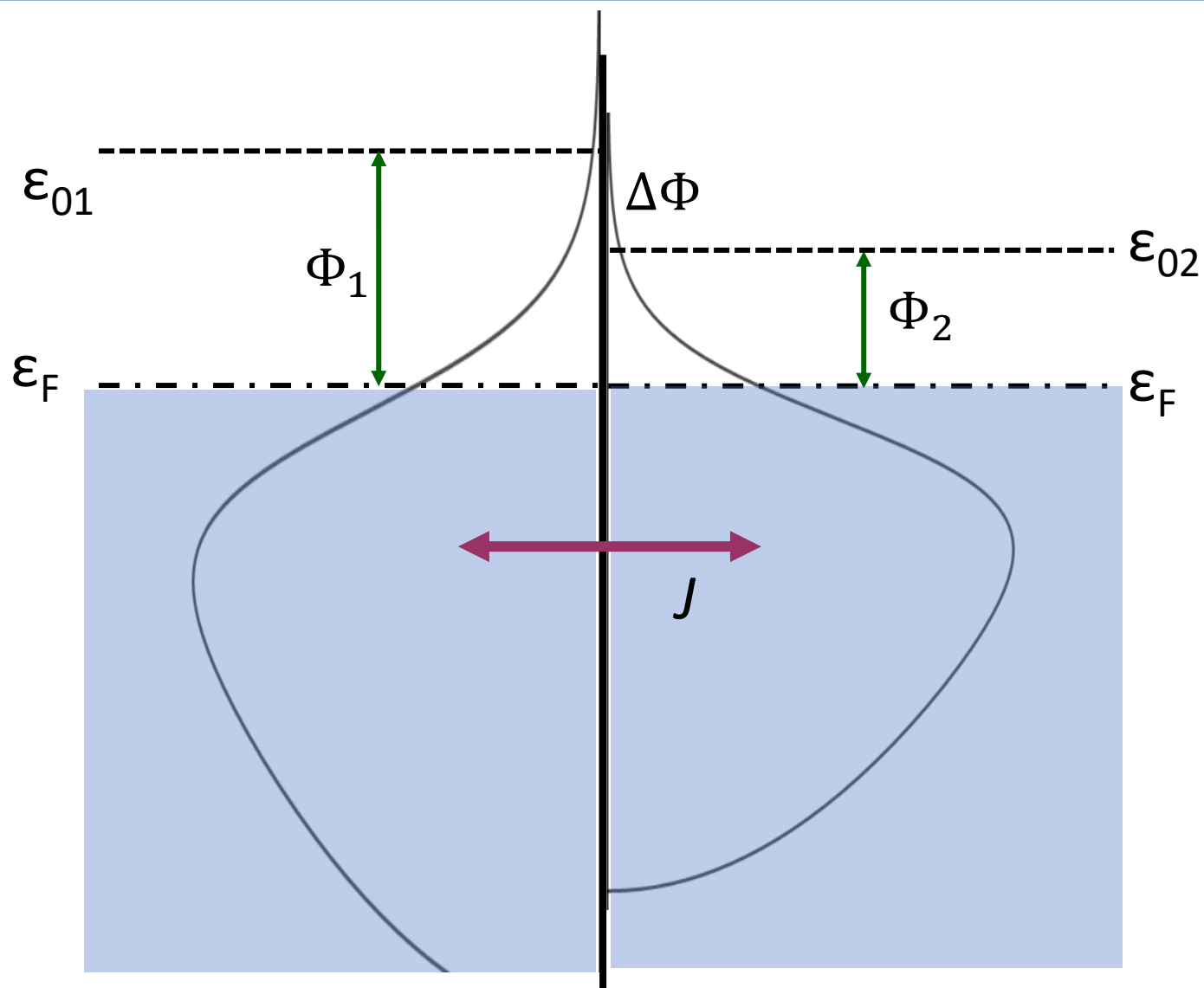


Термоэлектронная  
эмиссия:

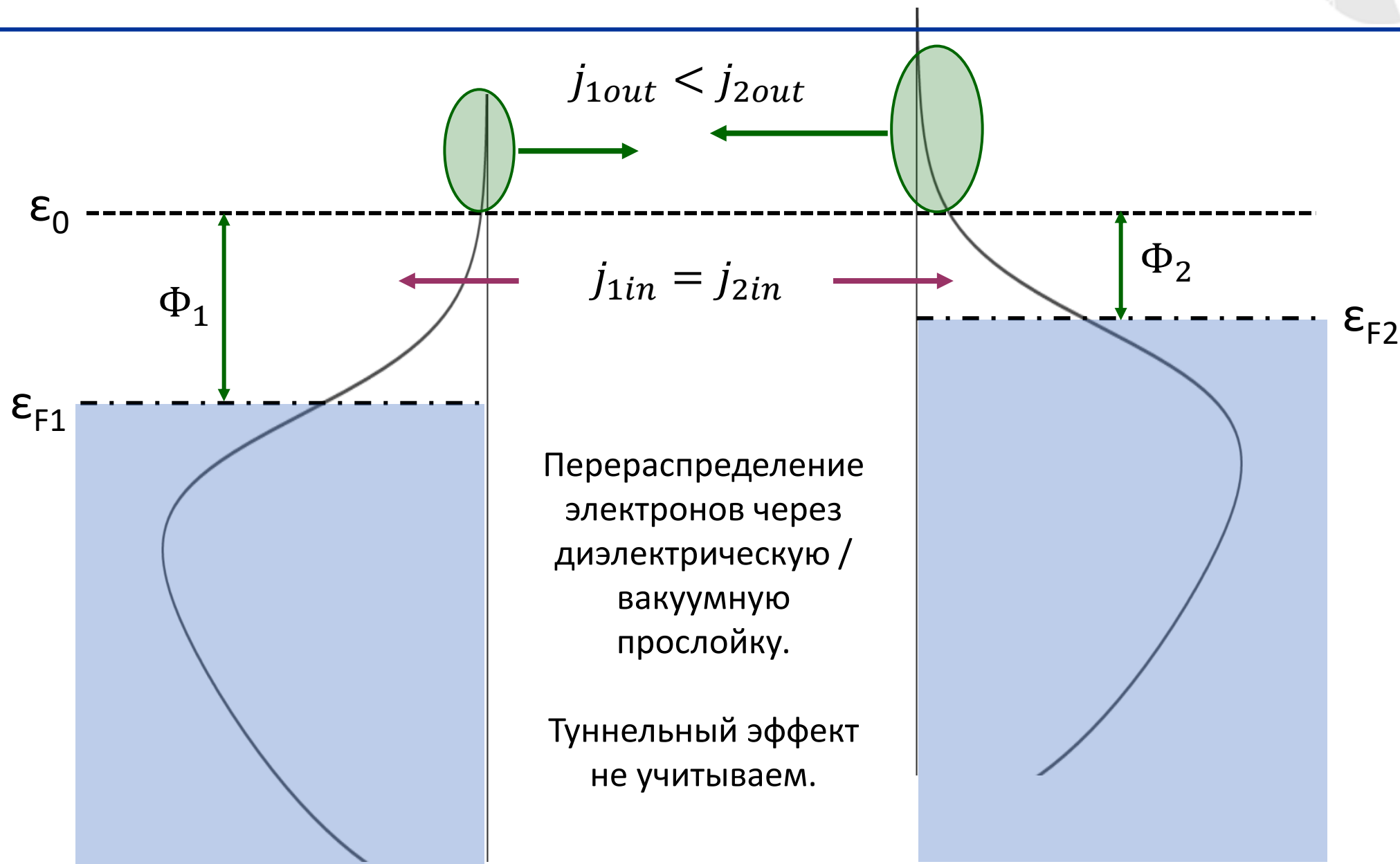
$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{kT}\right)$$

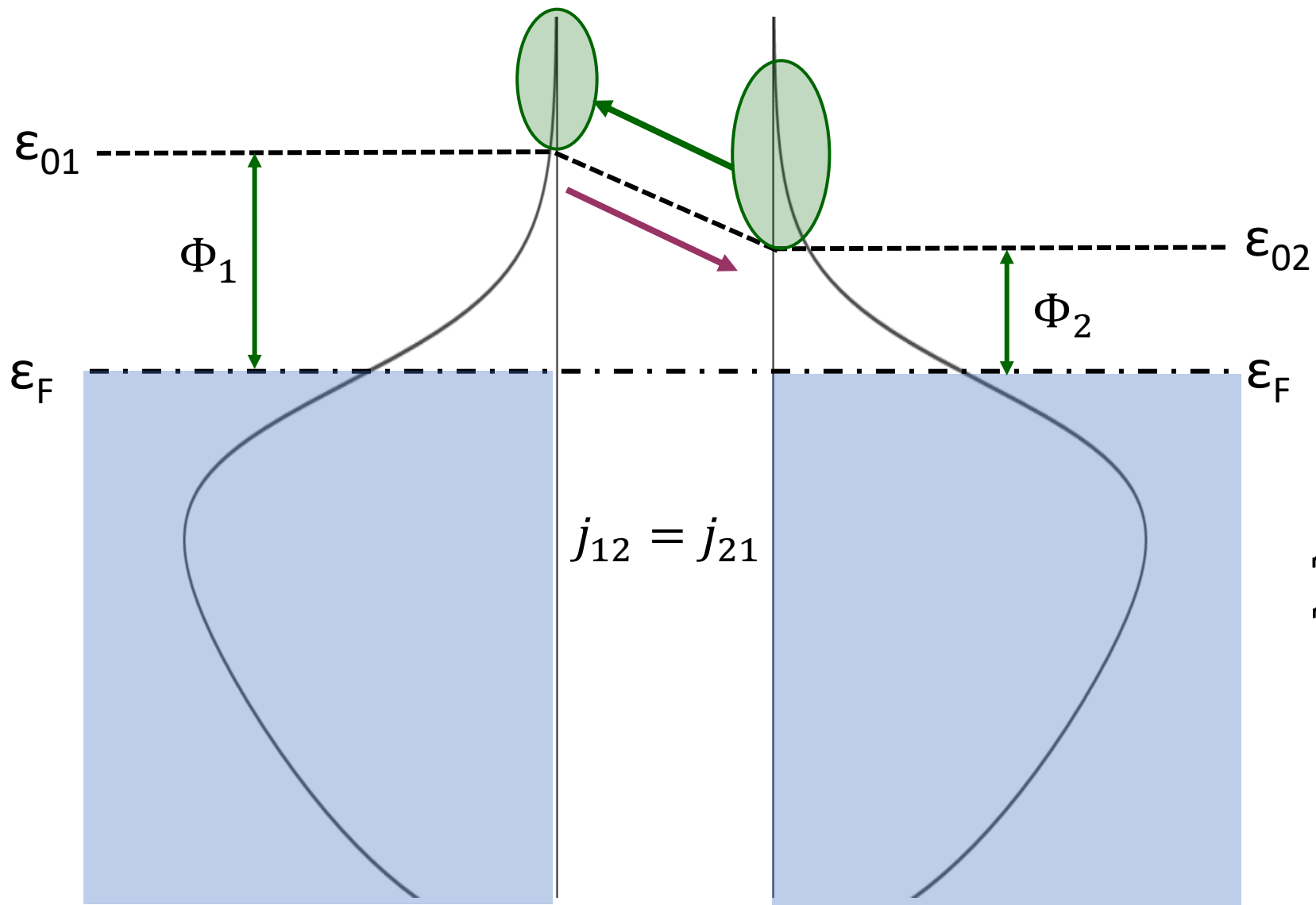






Подача  
напряжения  
смещения





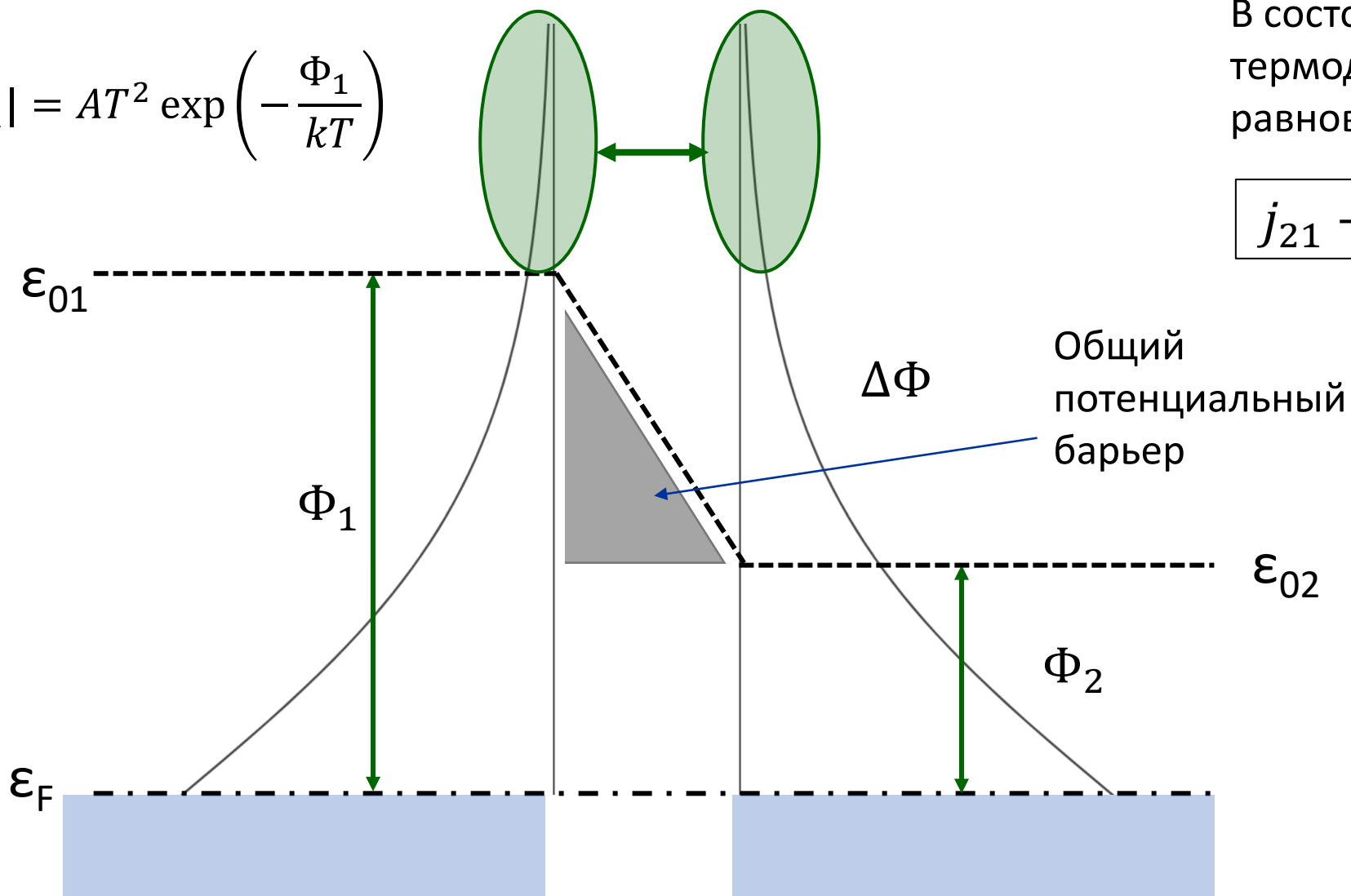
Диффузионный и  
дрейфовый токи



$$|j_{12}| = |j_{21}| = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_1}{kT}\right)$$

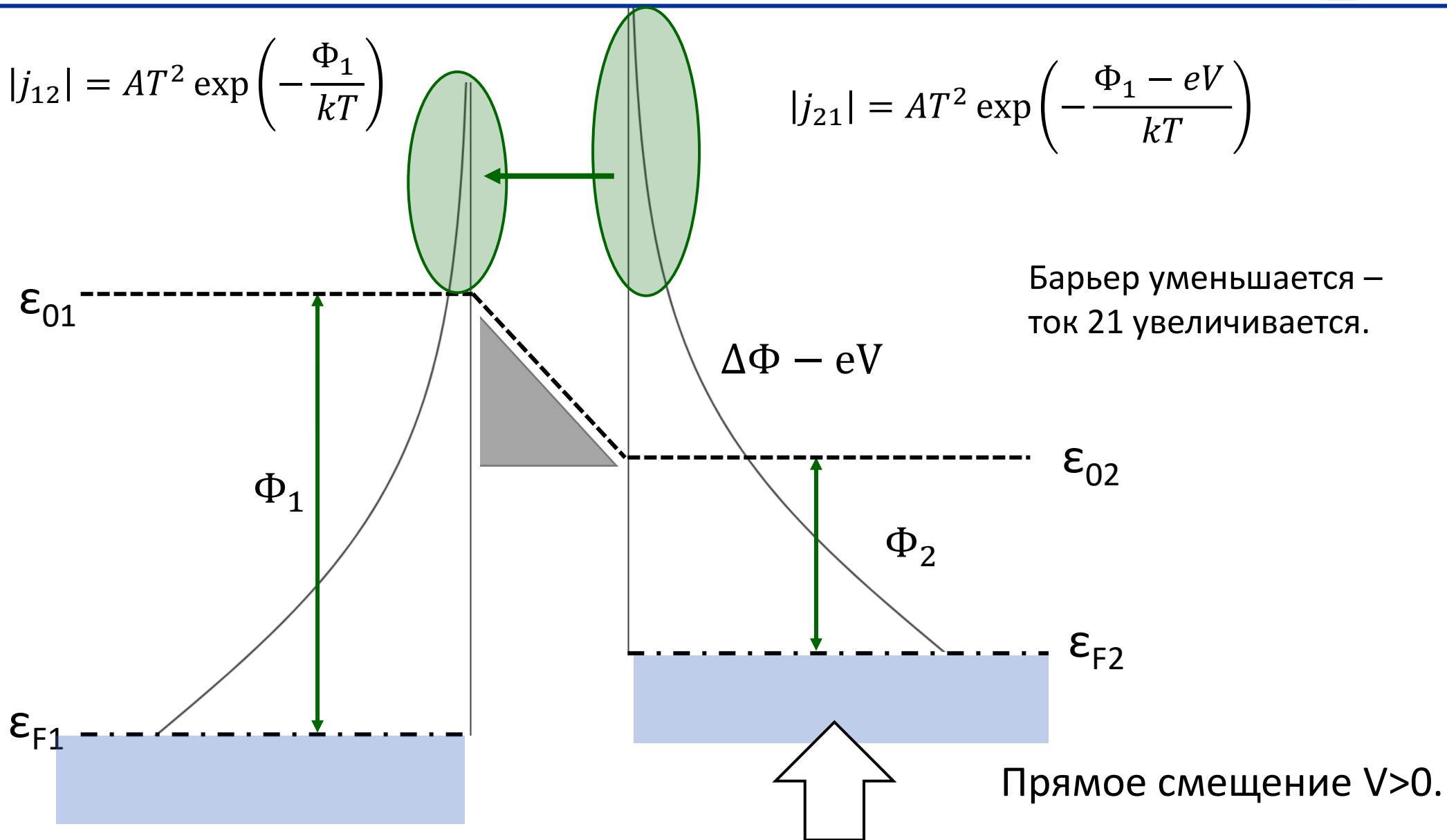
В состоянии  
термодинамического  
равновесия.

$$j_{21} + j_{12} = 0$$



$$|j_{12}| = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_1}{kT}\right)$$

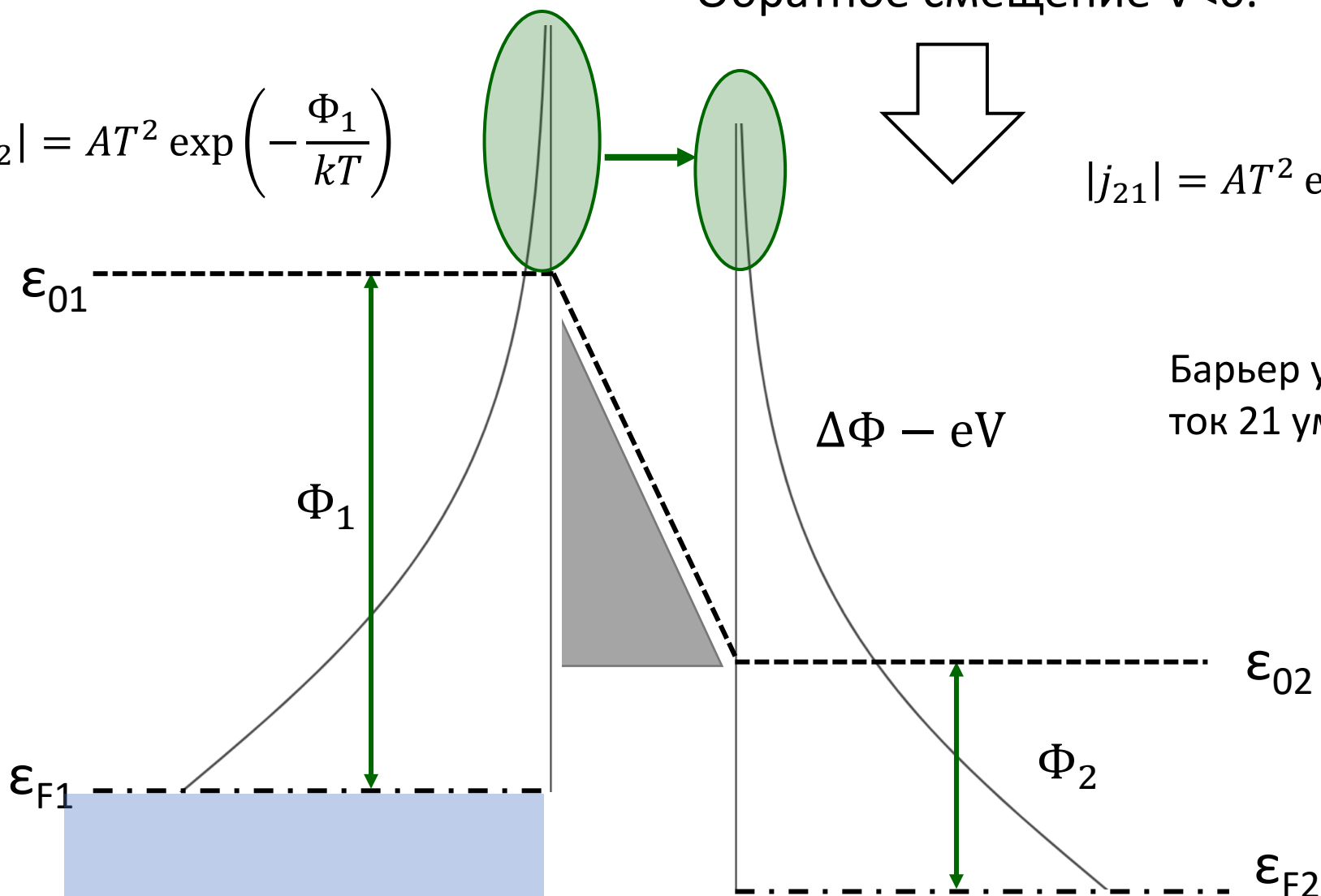
$$|j_{21}| = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_1 - eV}{kT}\right)$$



Обратное смещение  $V < 0$ .

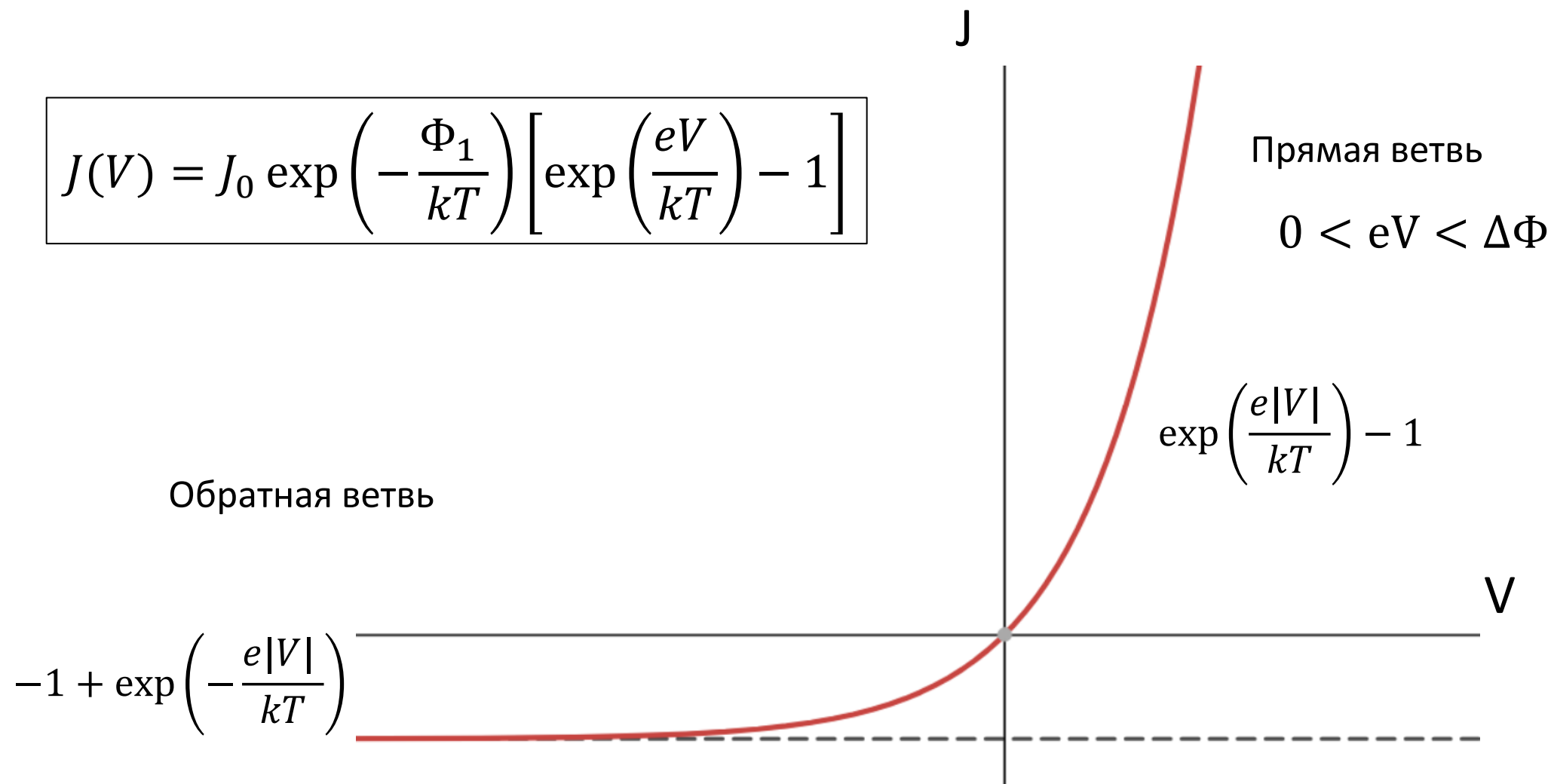
$$|j_{12}| = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_1}{kT}\right)$$

$$|j_{21}| = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_1 - eV}{kT}\right)$$



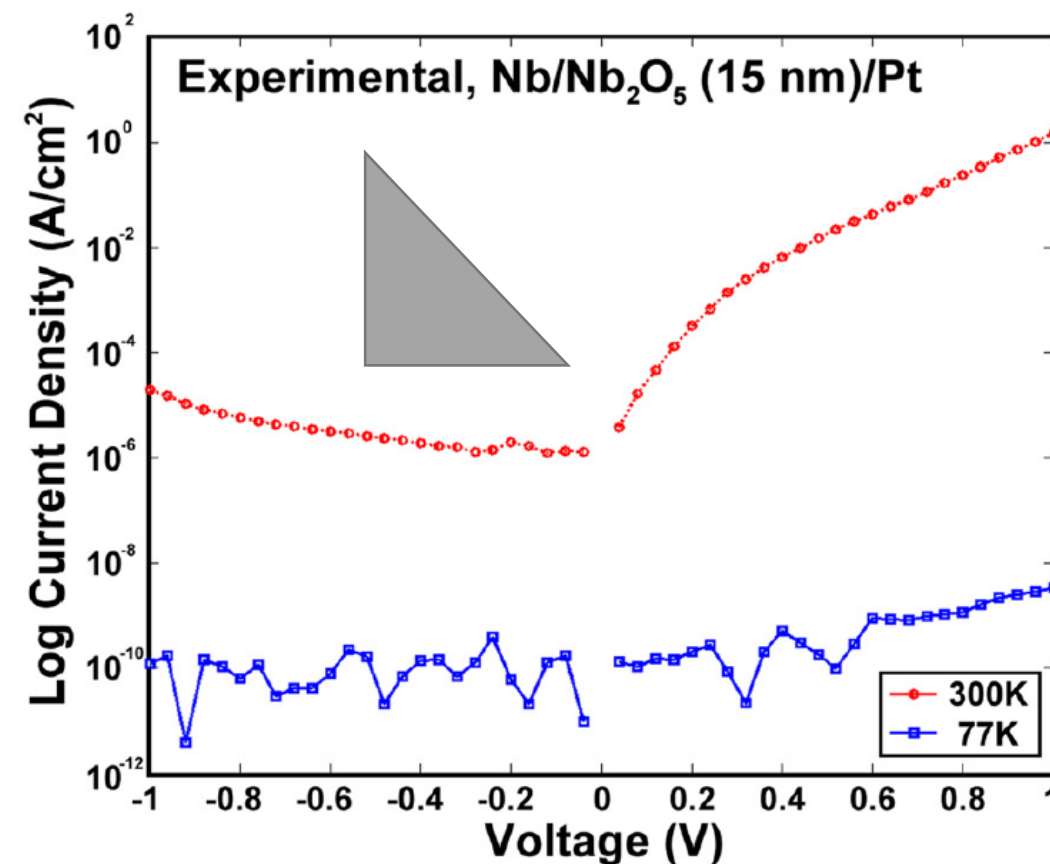
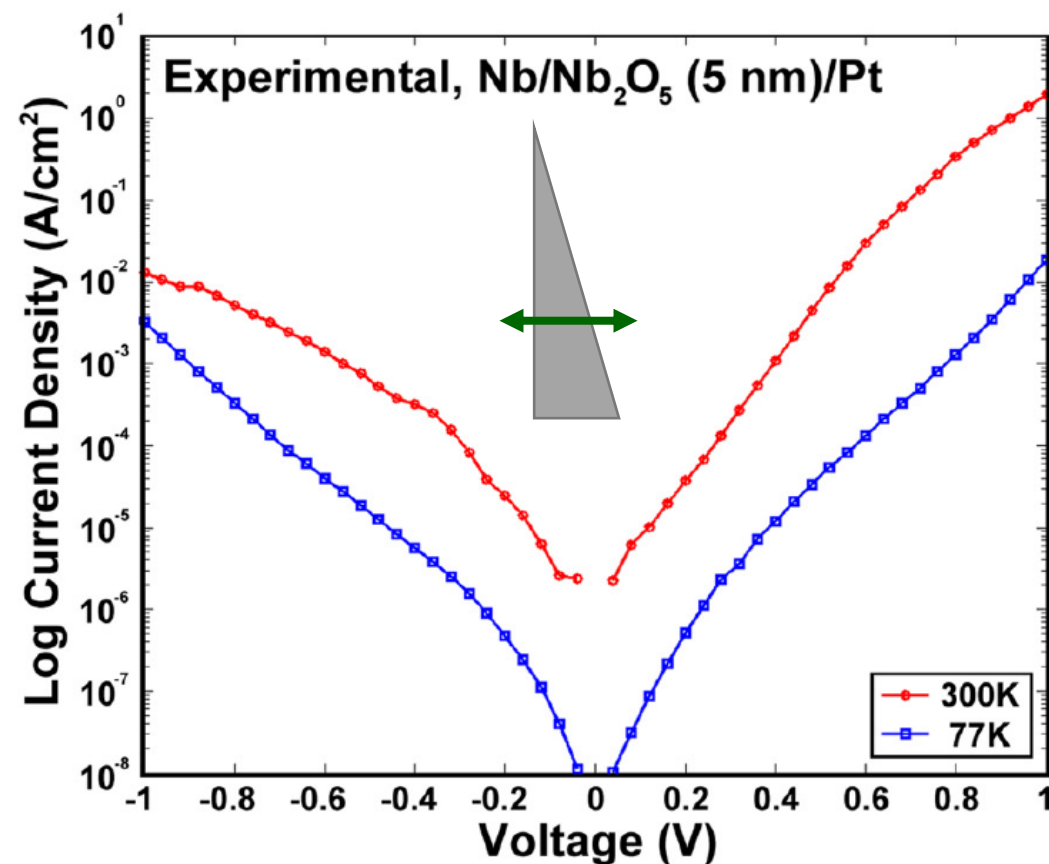
Барьер увеличивается – ток 21 уменьшается.

$$J(V) = J_0 \exp\left(-\frac{\Phi_1}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$

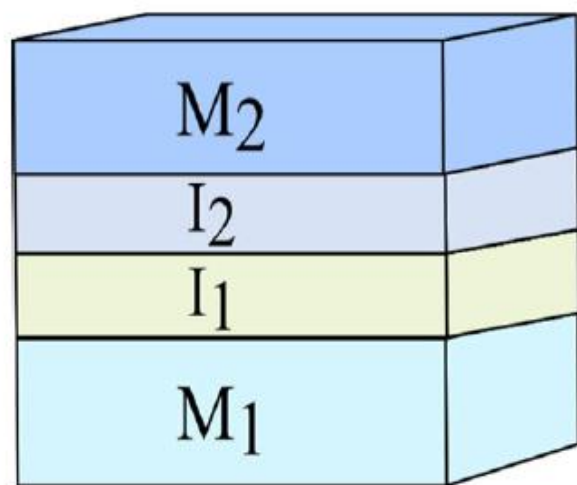


## Влияние туннельного эффекта.

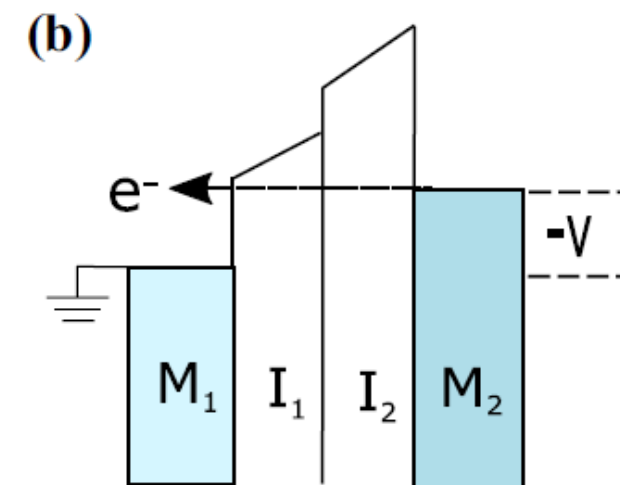
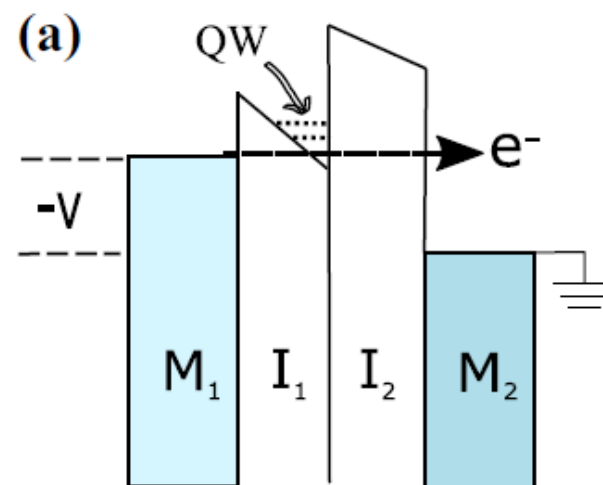
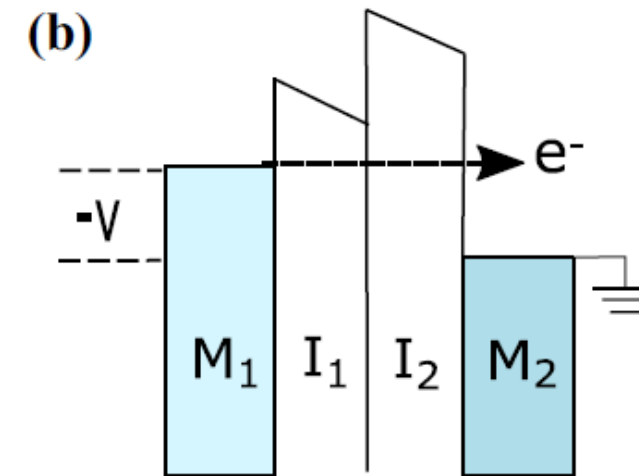
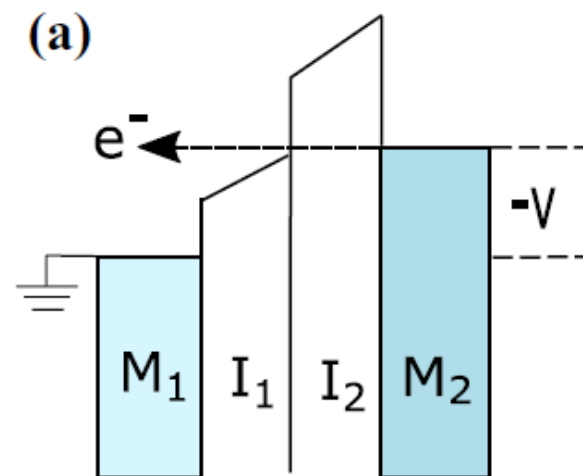
Chin *et al.*: Planar MIM diodes based on the Nb/Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/X material system



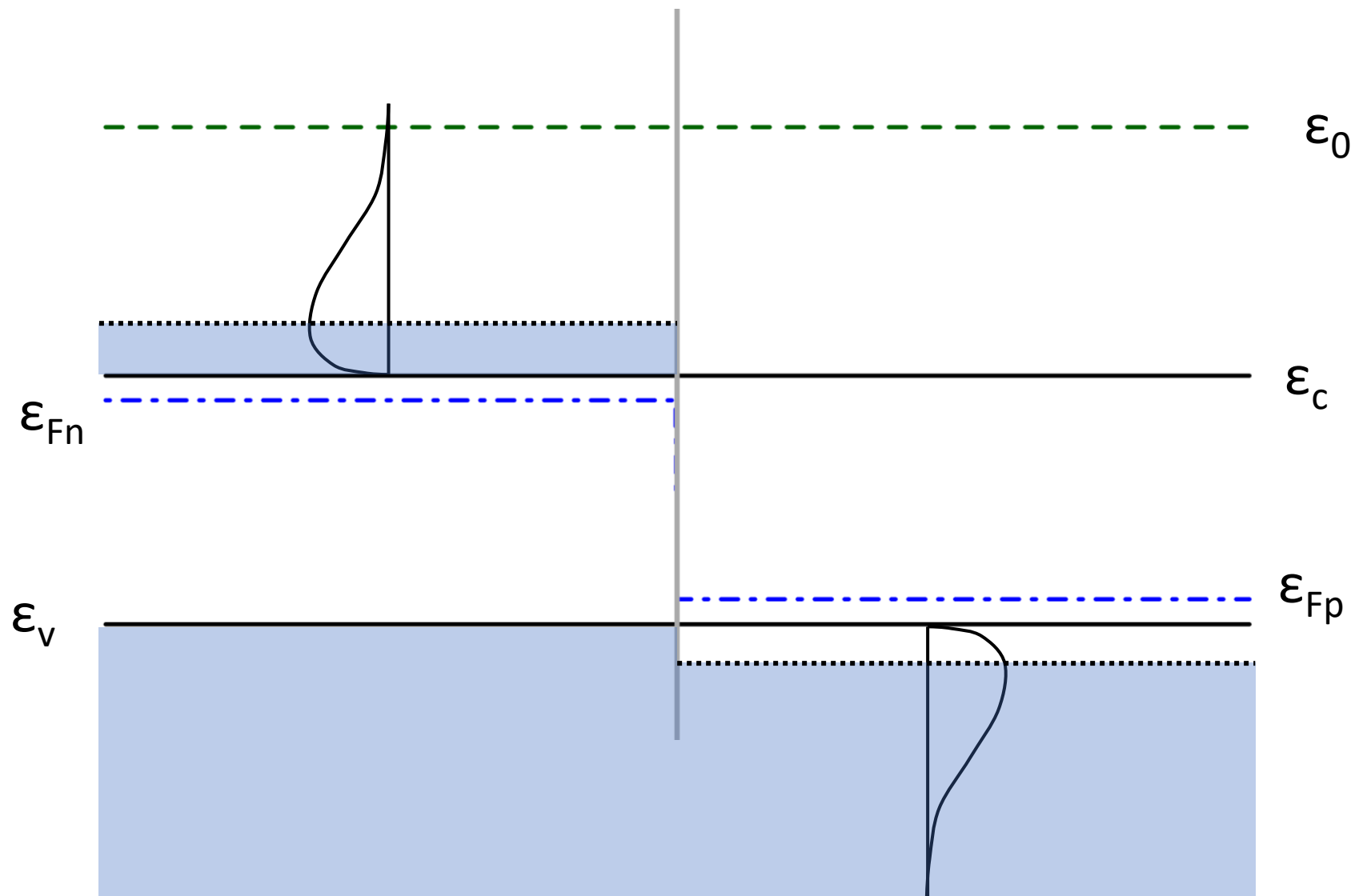
Два диэлектрика.



Shriwastava and Tripathi.  
Journal of ELECTRONIC  
MATERIALS, Vol. 48, No. 5,  
2019

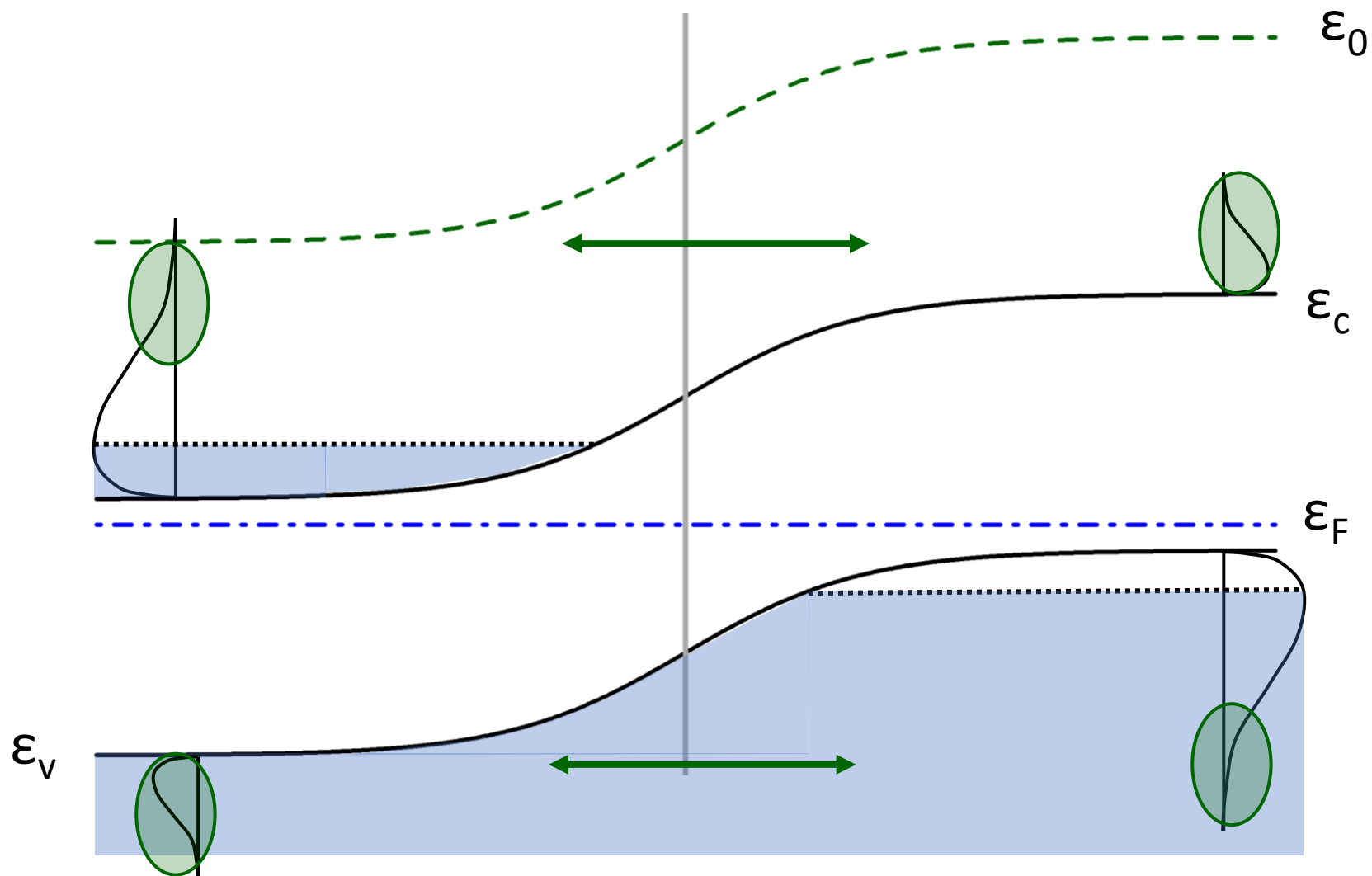


До  
установления  
равновесия



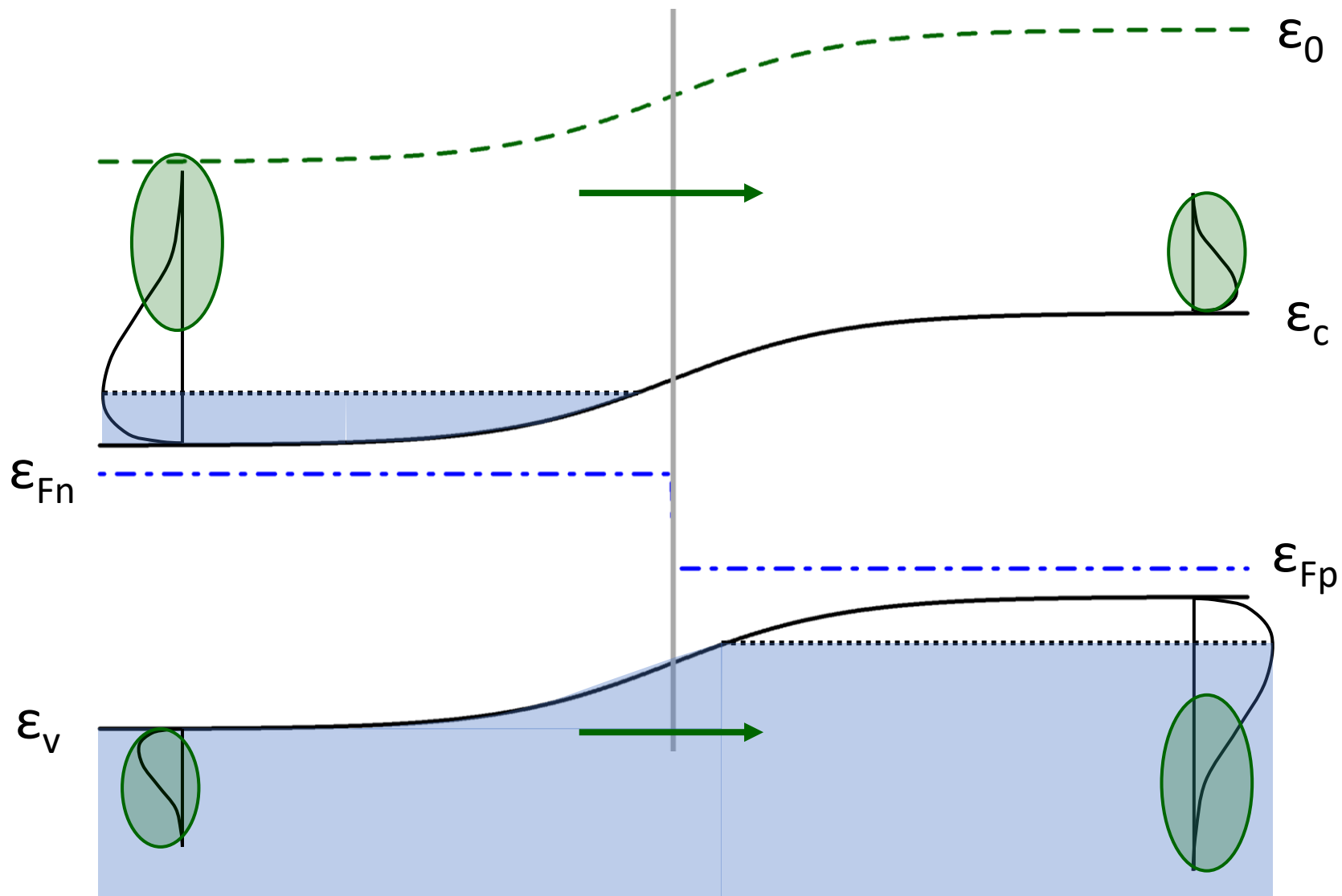


После  
установления  
равновесия



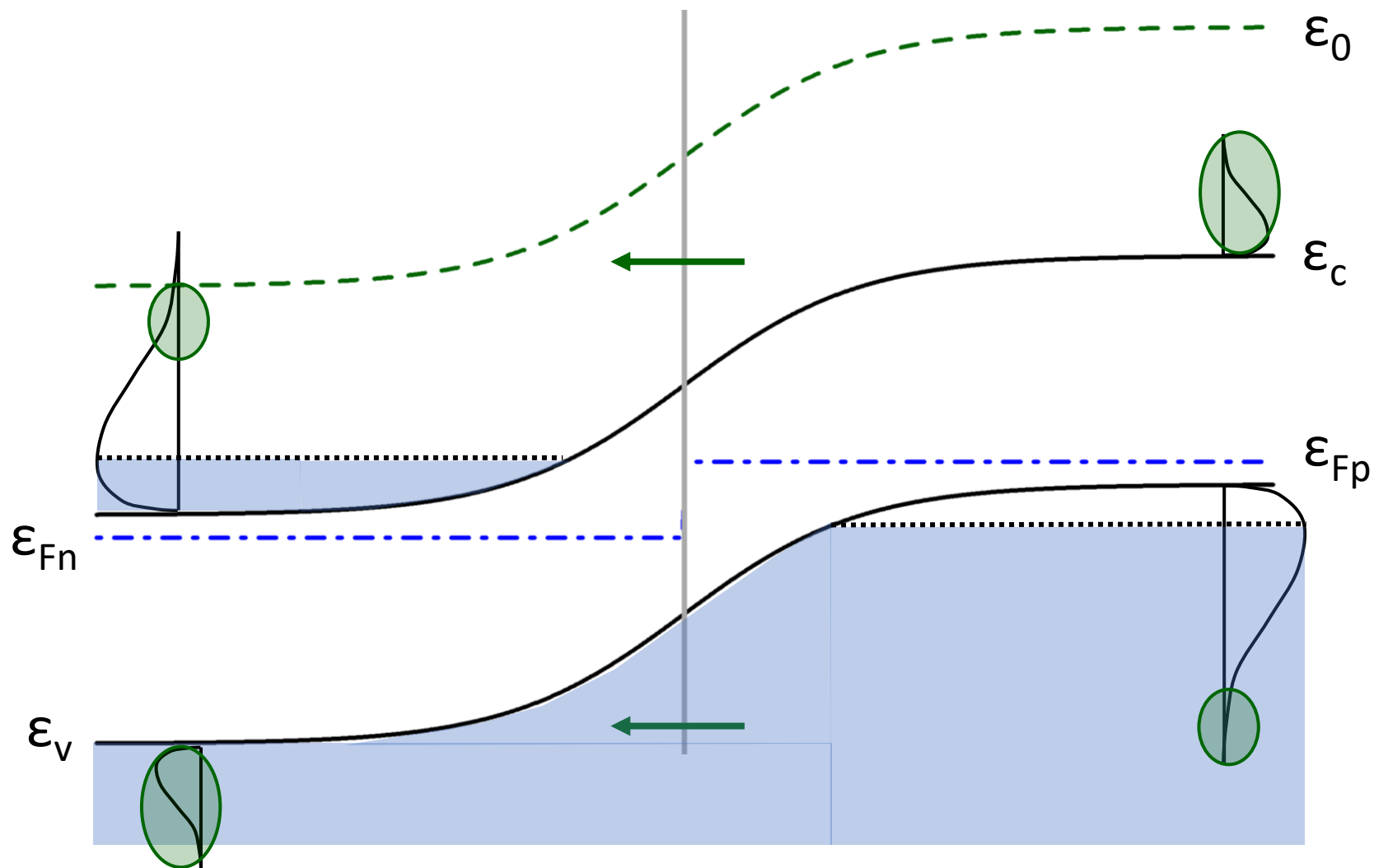
Прямое  
смещение  
 $V > 0$

Барьер  
уменьшается –  
ток слева  
направо  
увеличивается.

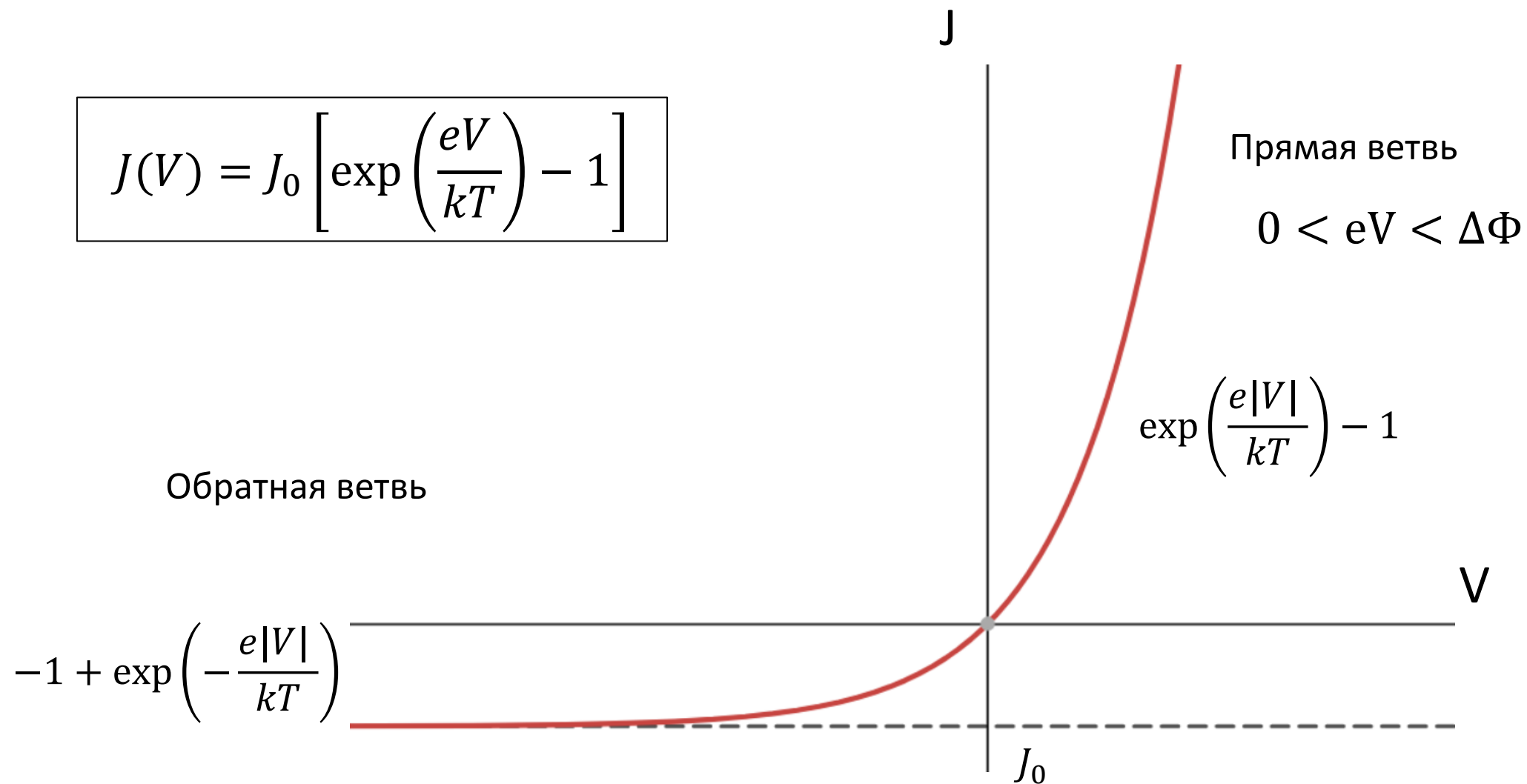


Обратное  
смещение  
 $V < 0$

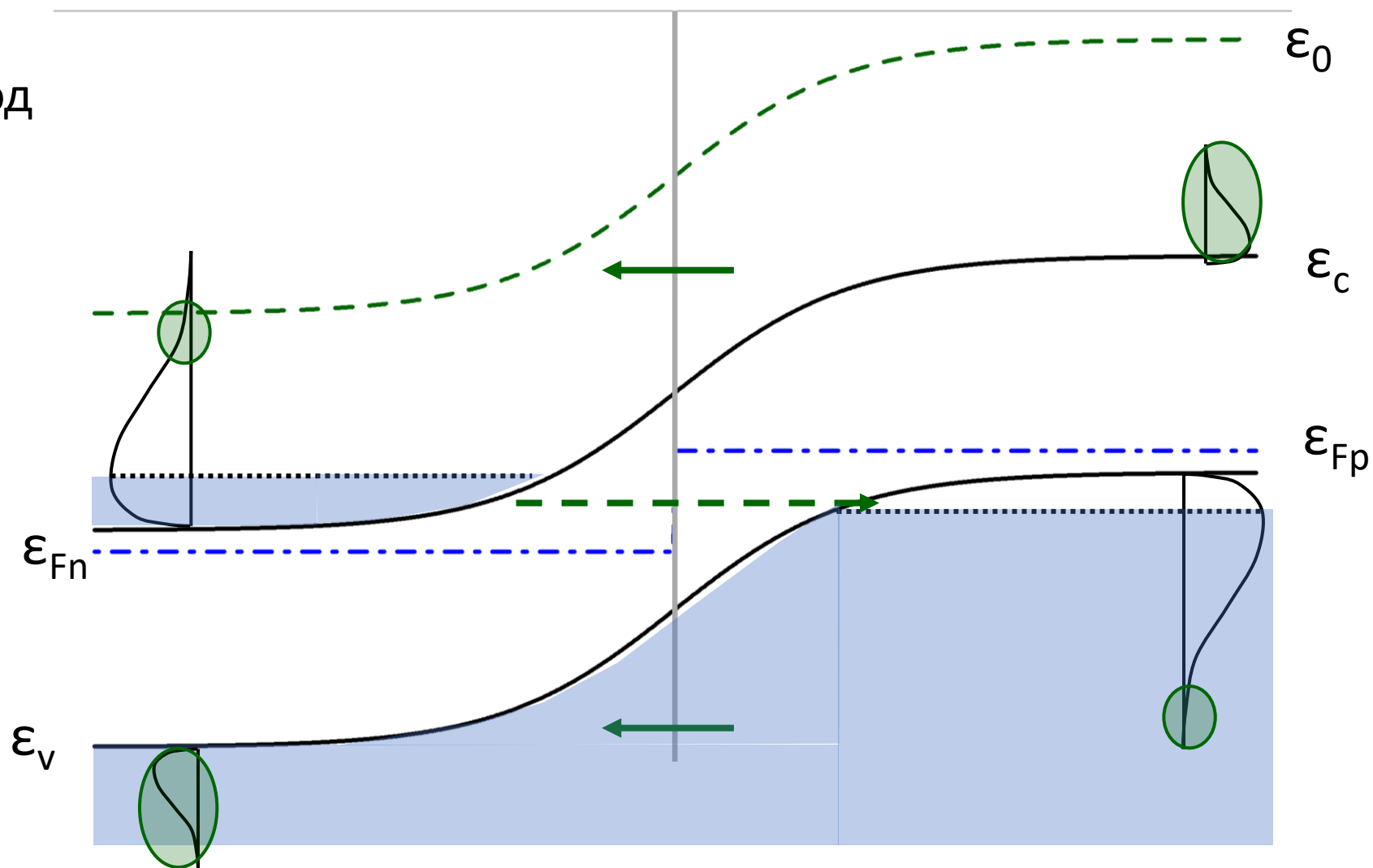
Барьер  
увеличивается  
— ток слева  
направо  
уменьшается.

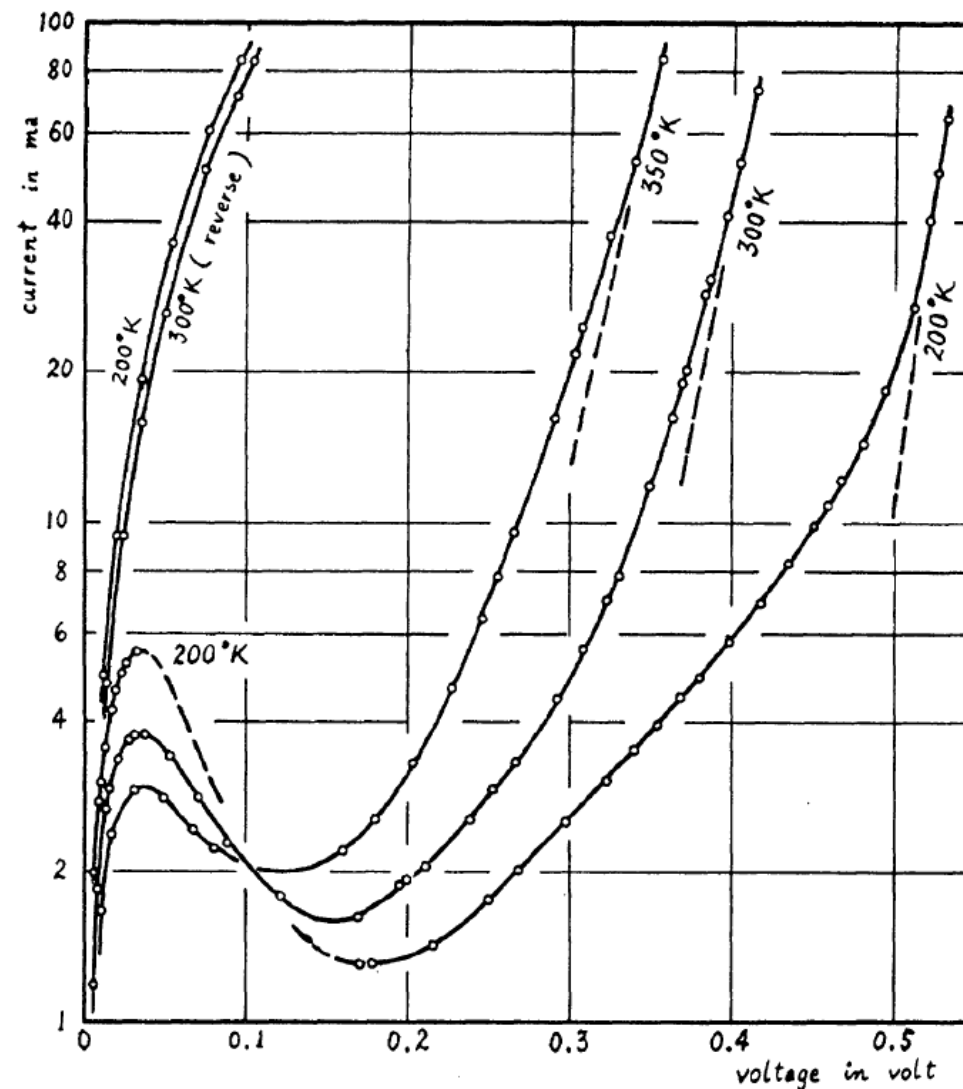
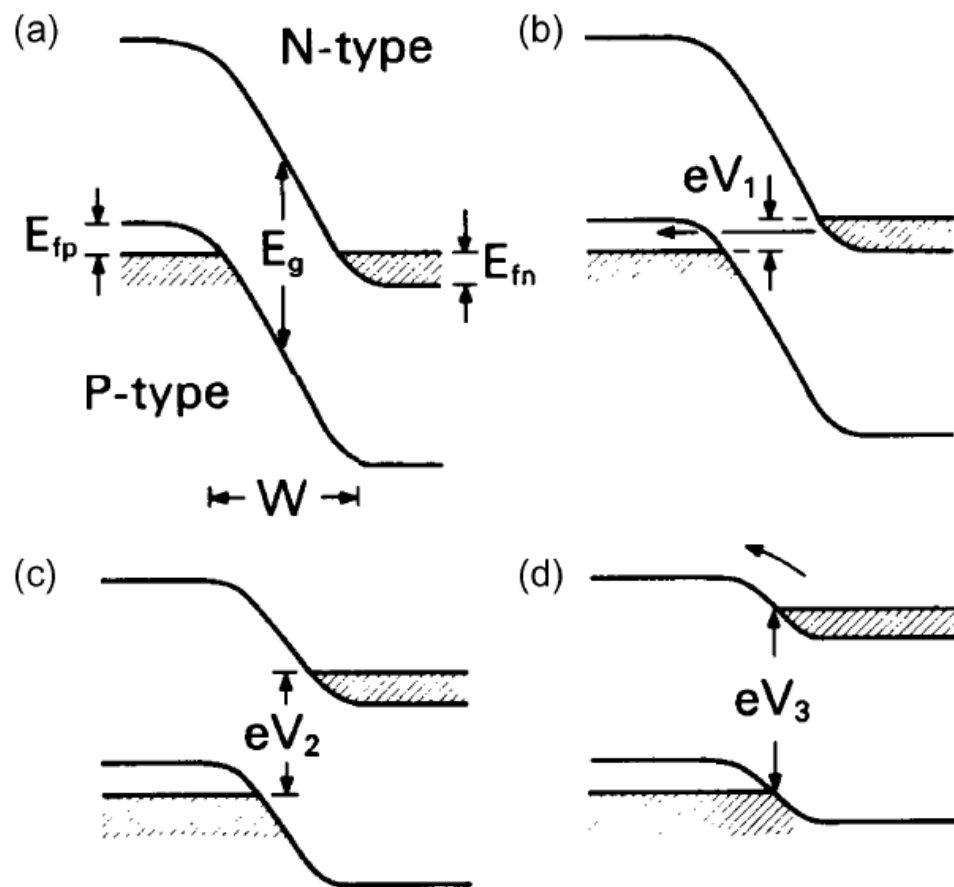


$$J(V) = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$



Туннельный диод

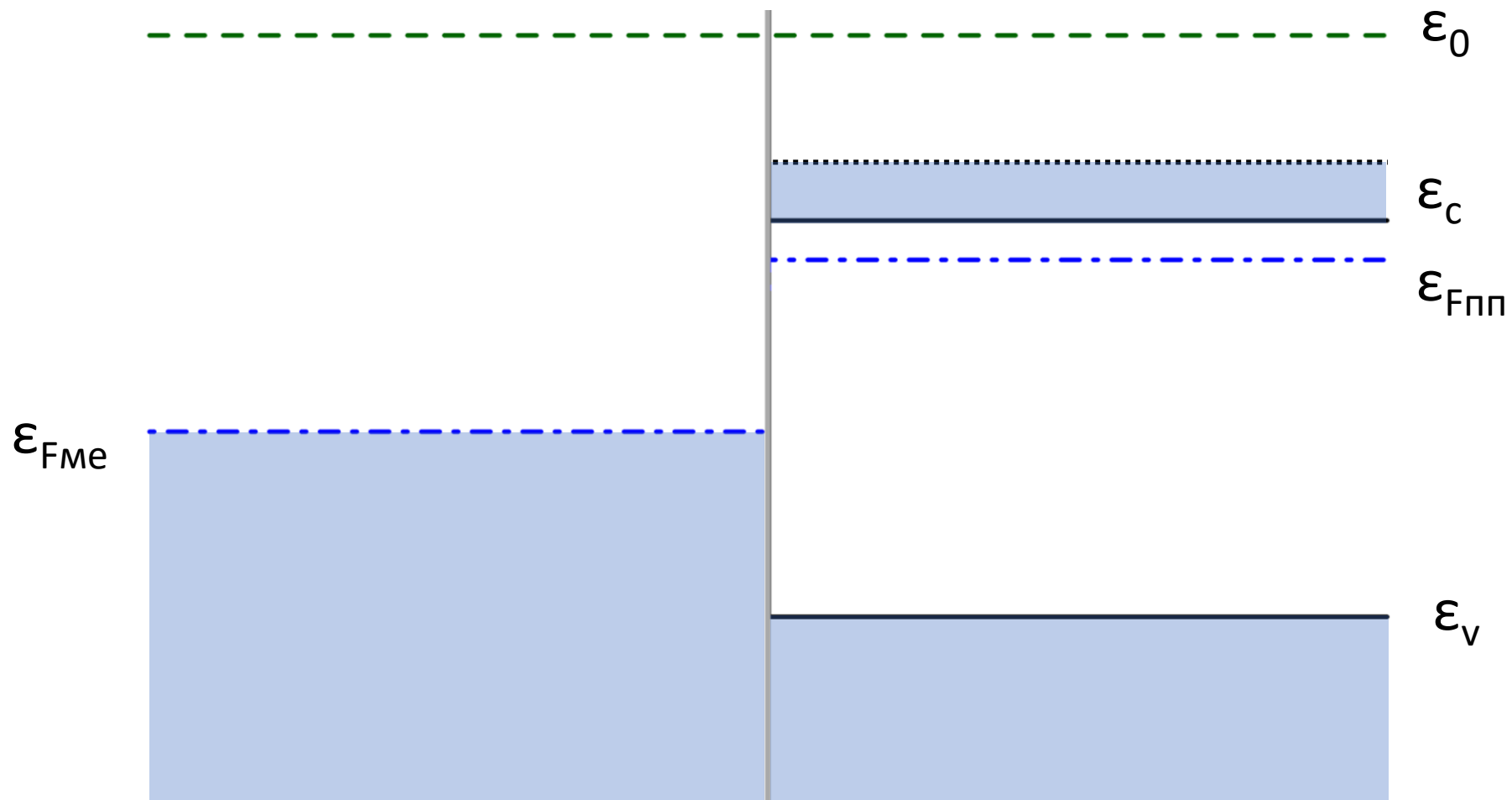




**Fig. 14.** Esaki's energy diagrams at varying bias conditions in the tunnel diode [28], copyright (2014) by the American Physical Society.



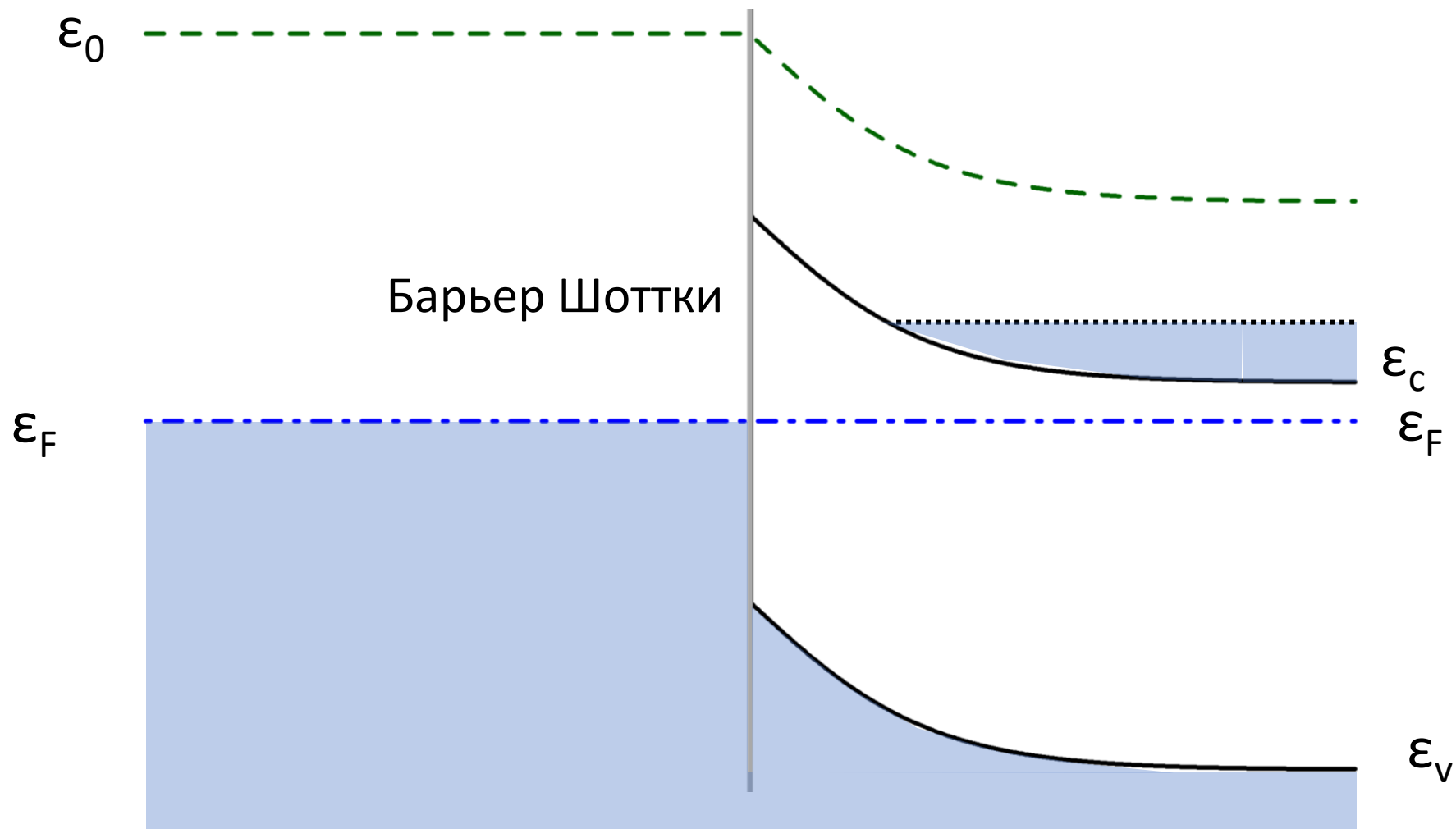
До  
установления  
равновесия





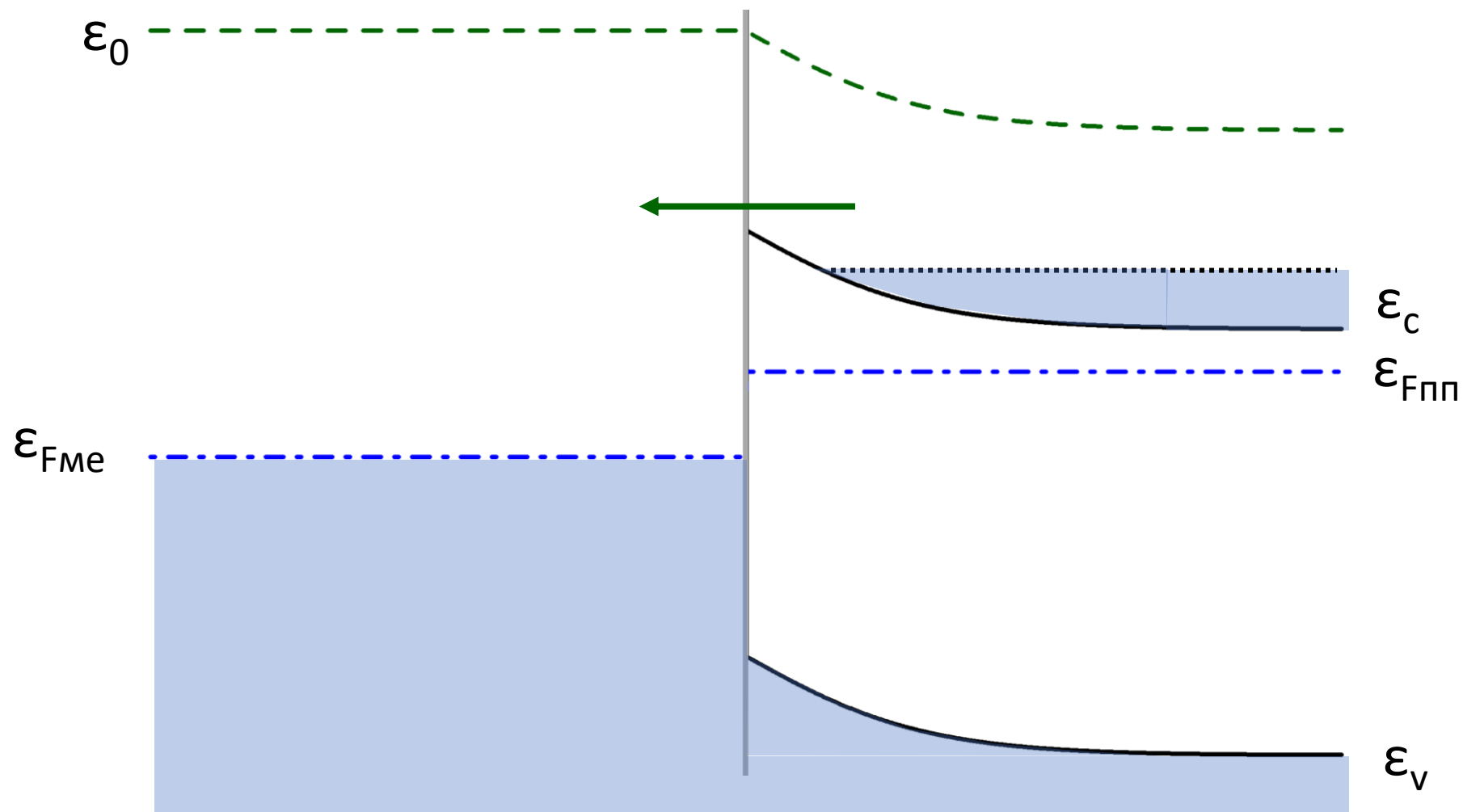


После  
установления  
равновесия





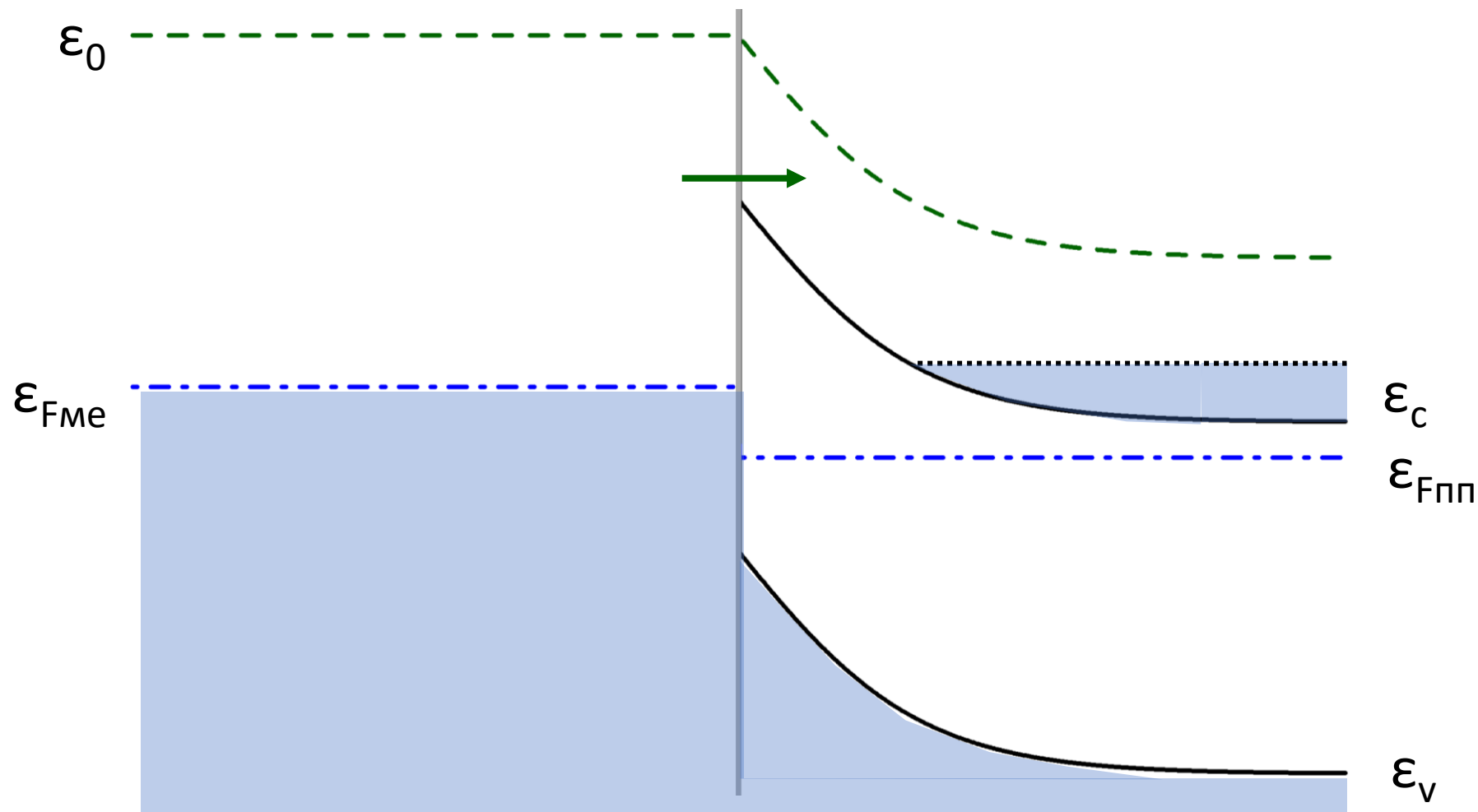
Прямое  
смещение  
 $V > 0$



Барьер  
уменьшается –  
ток справа  
налево  
увеличивается.

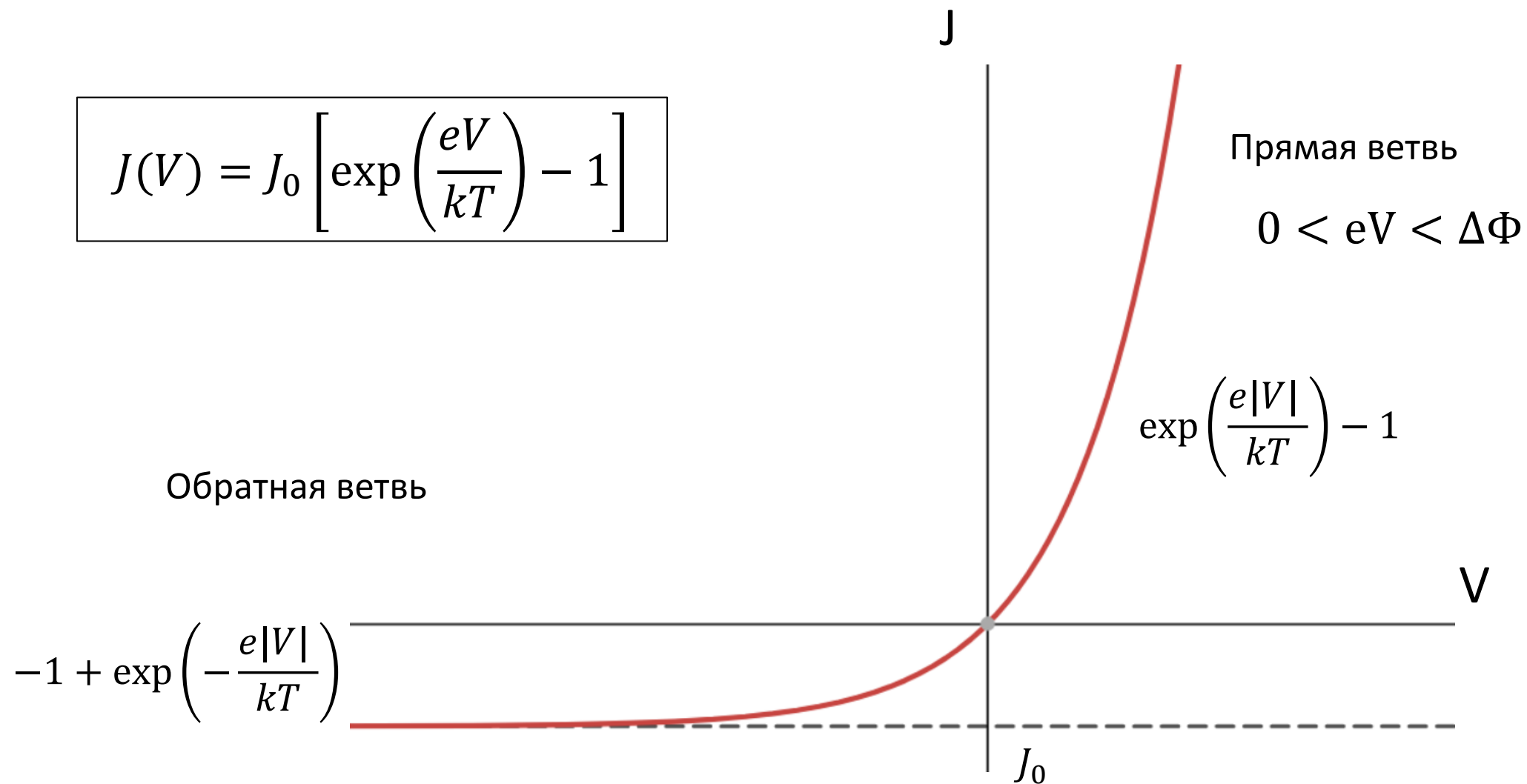


Обратное  
смещение  
 $V < 0$



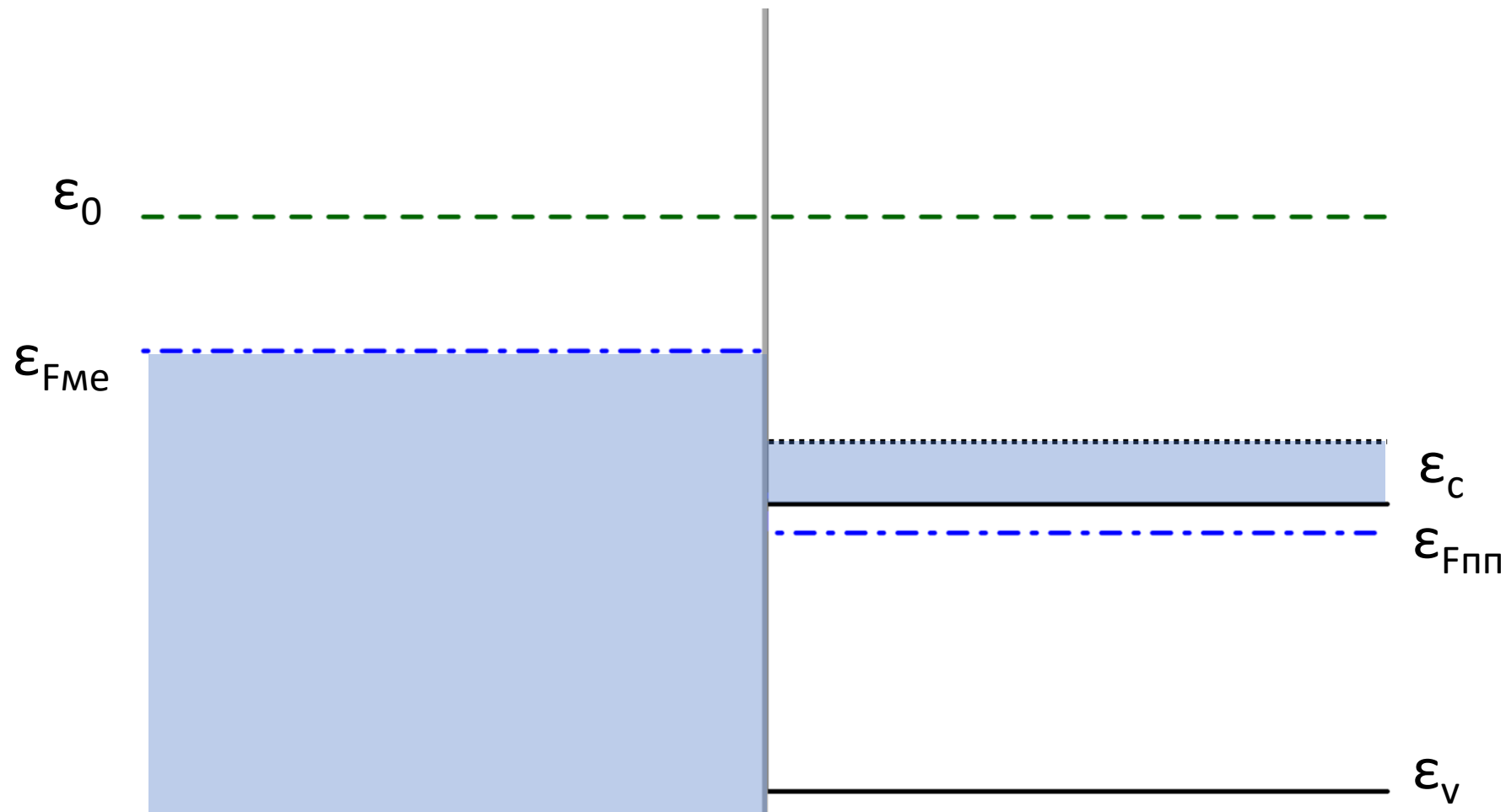
Барьер  
увеличивается  
— ток справа  
налево  
уменьшается.

$$J(V) = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right]$$



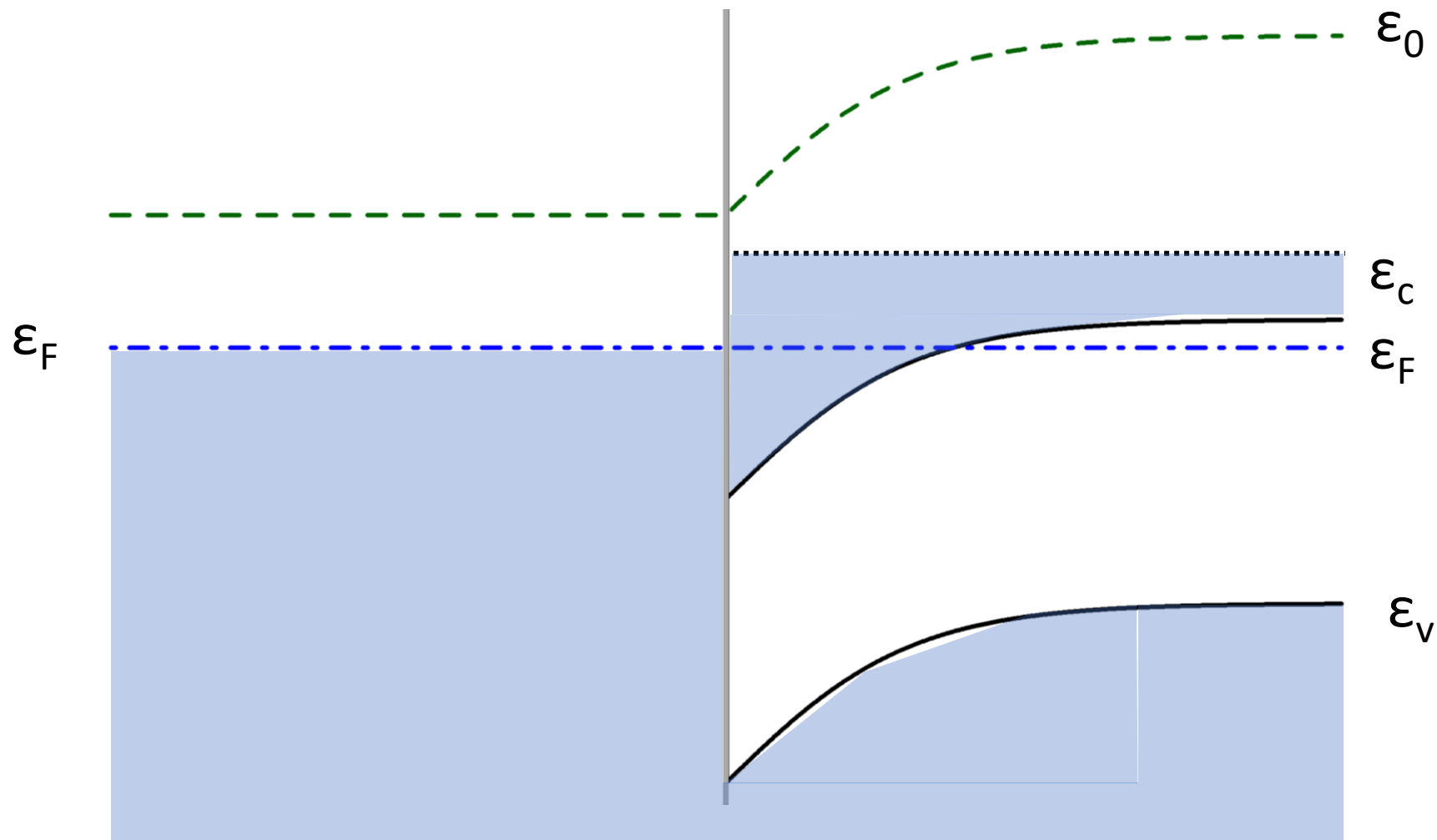


До  
установления  
равновесия



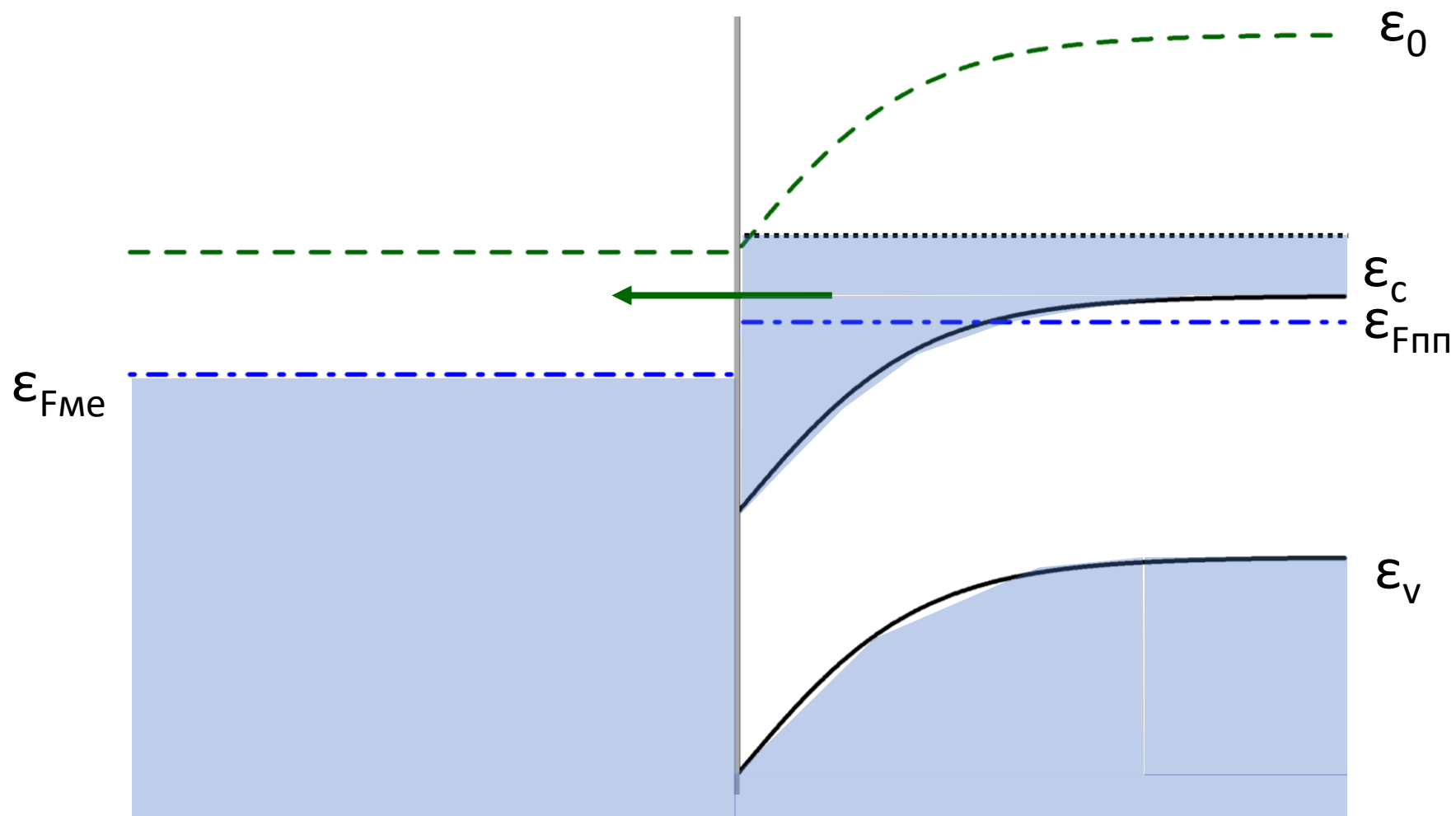


После  
установления  
равновесия





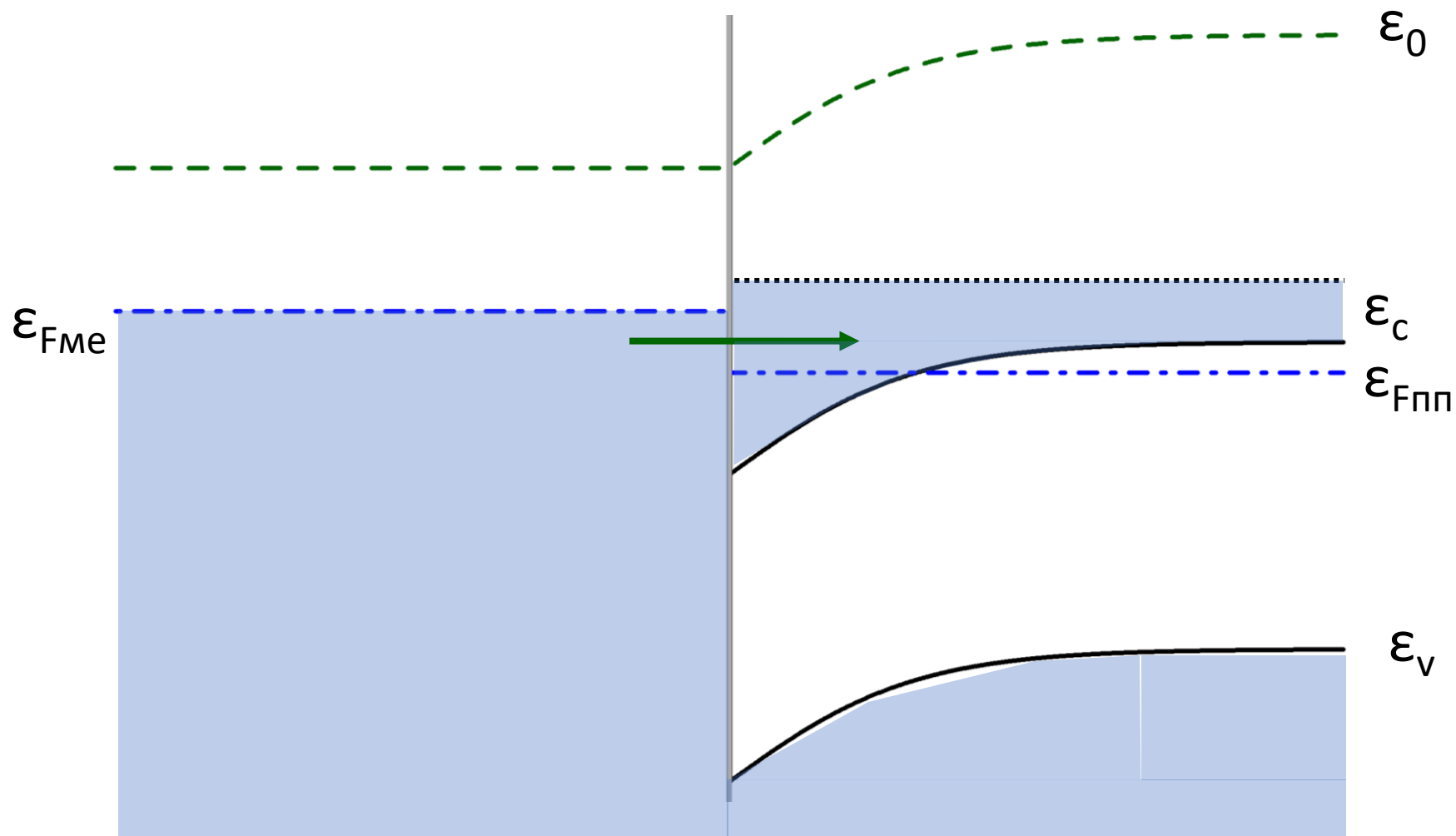
Прямое  
смещение  
 $V > 0$

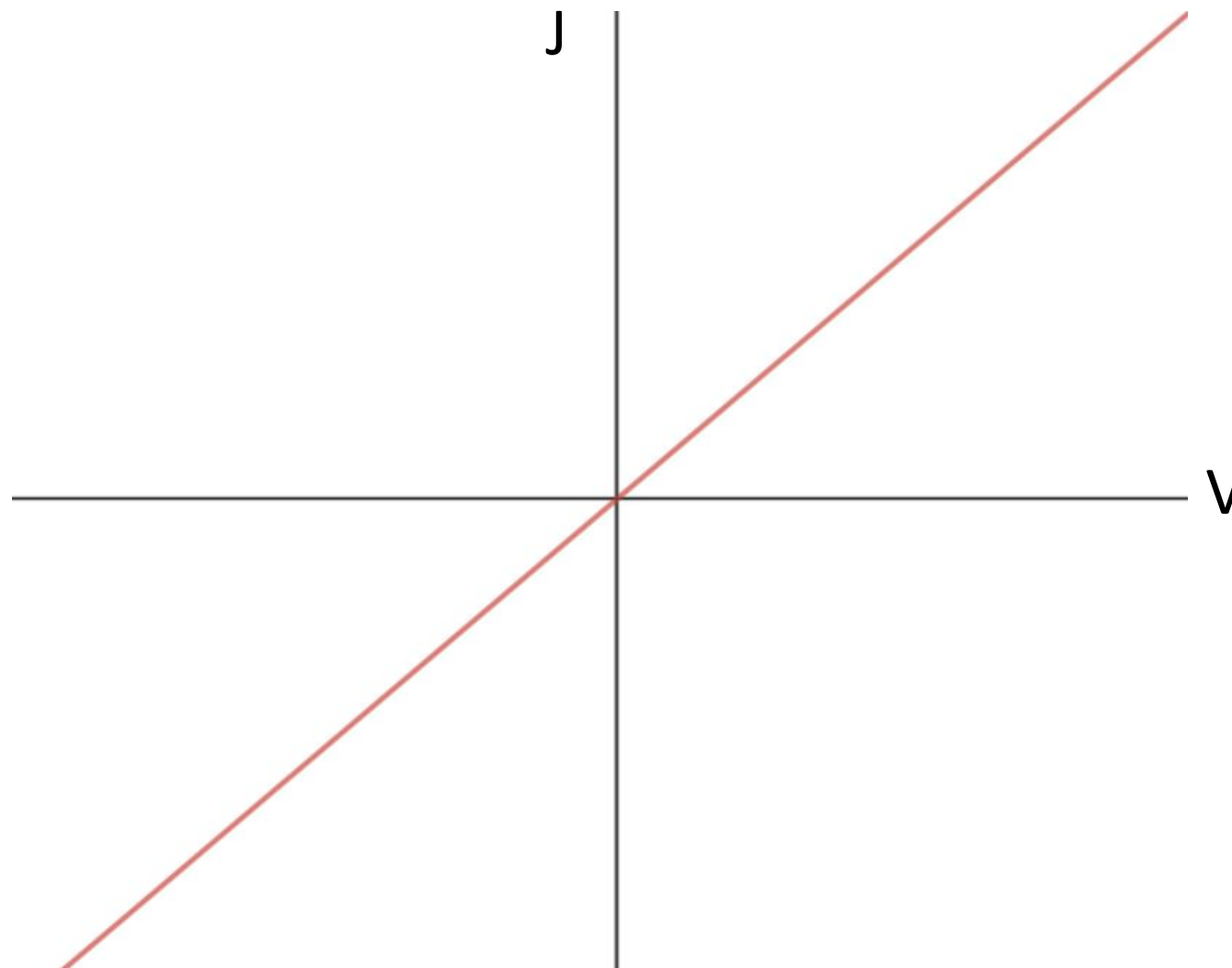






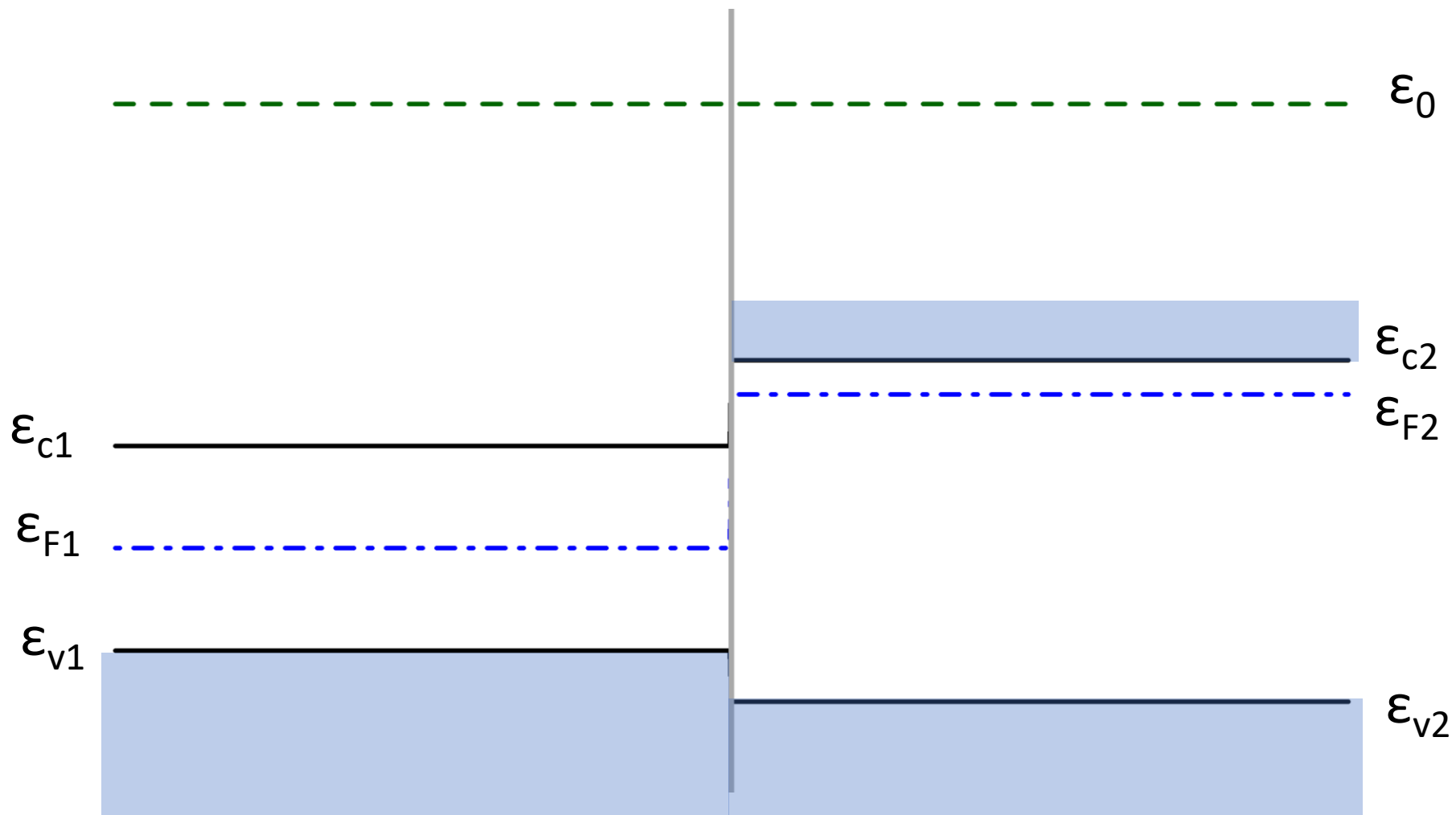
Обратное  
смещение  
 $V < 0$



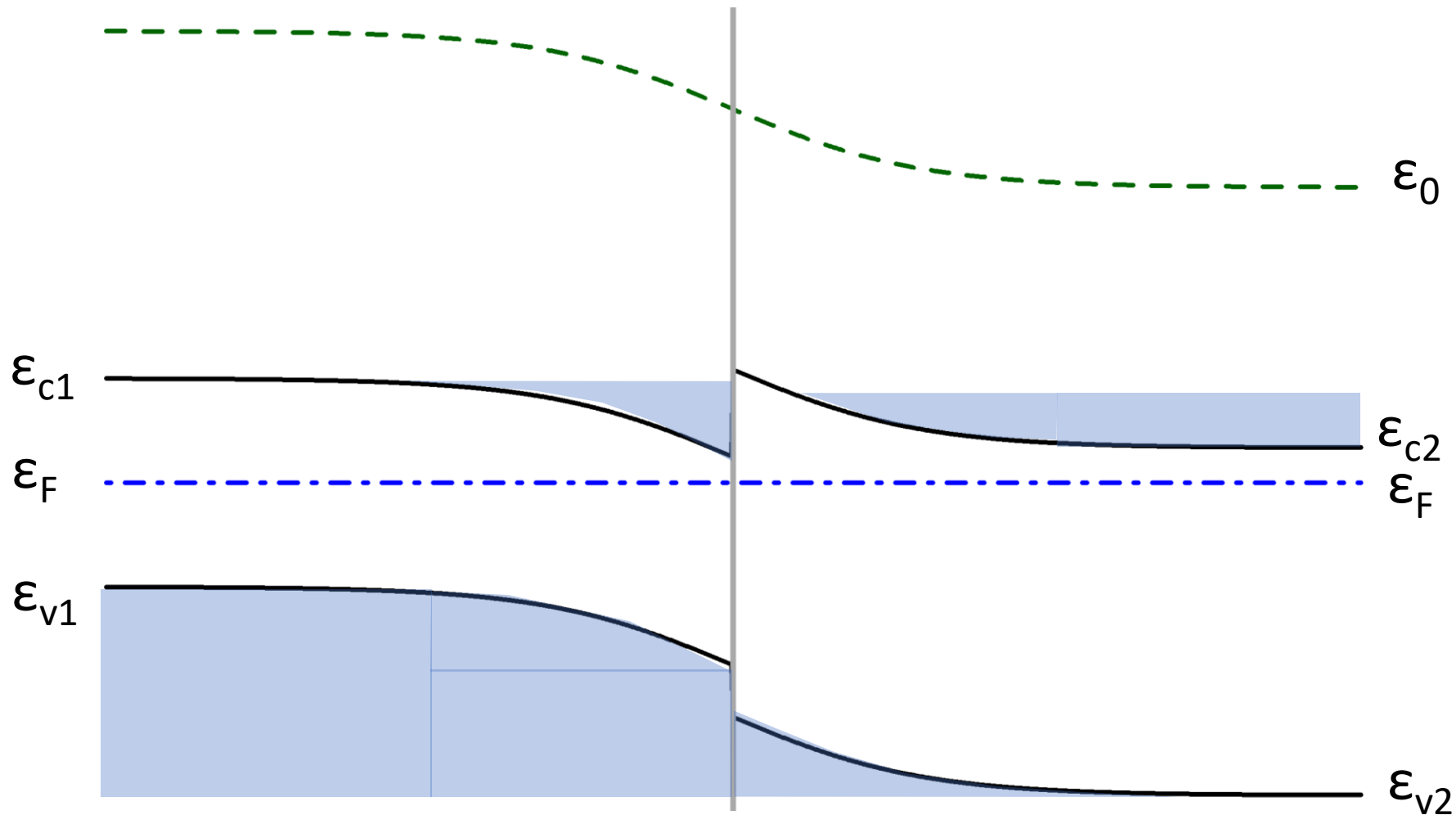




До  
установления  
равновесия



После  
установления  
равновесия



Спасибо за внимание