

Квантовая макрофизика.

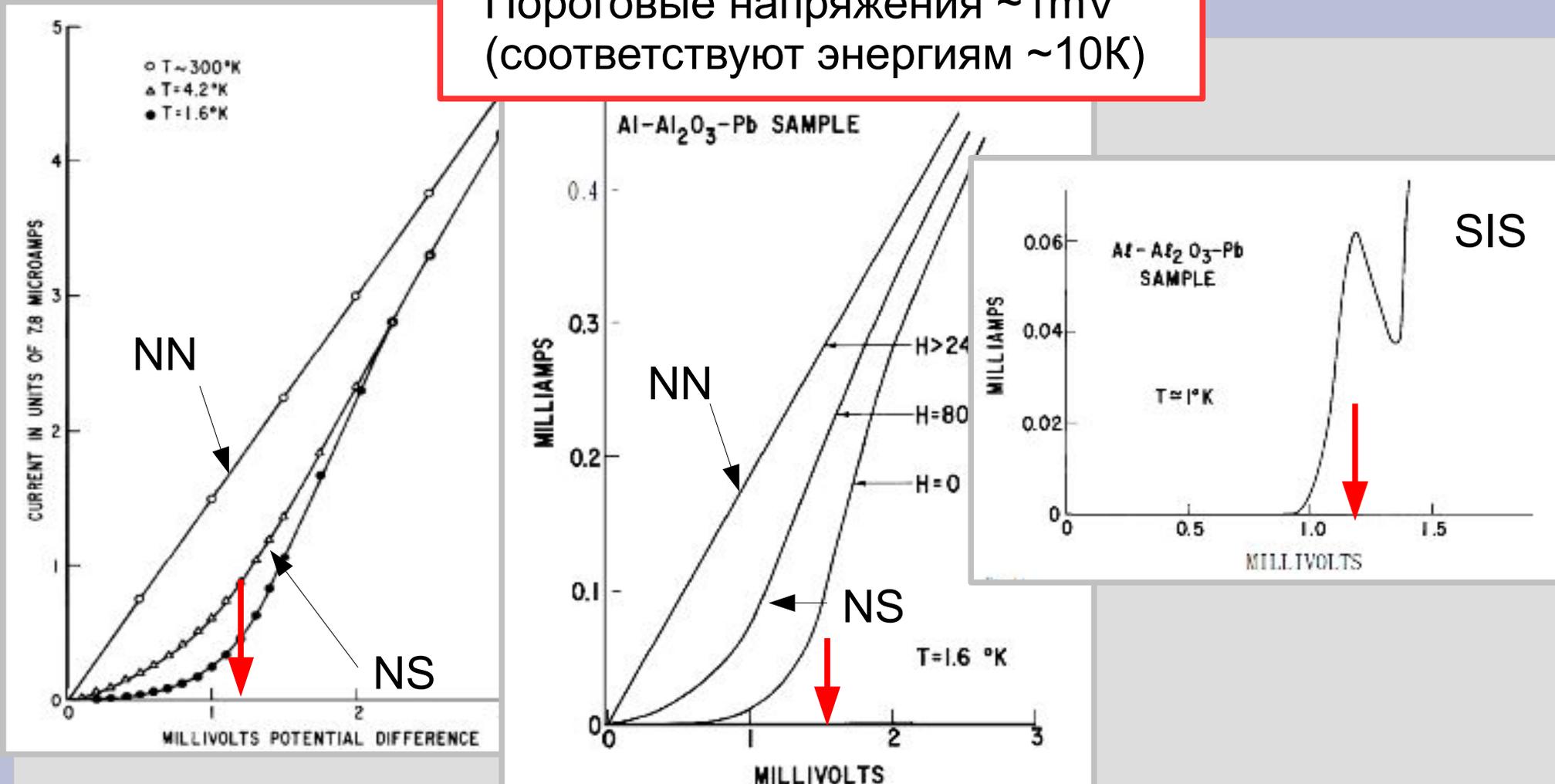
Лекция 11. Контактные явления в полупроводниках.

Построение энергетических диаграмм
контактов полупроводников.

Немного про туннелирование в сверхпроводниках

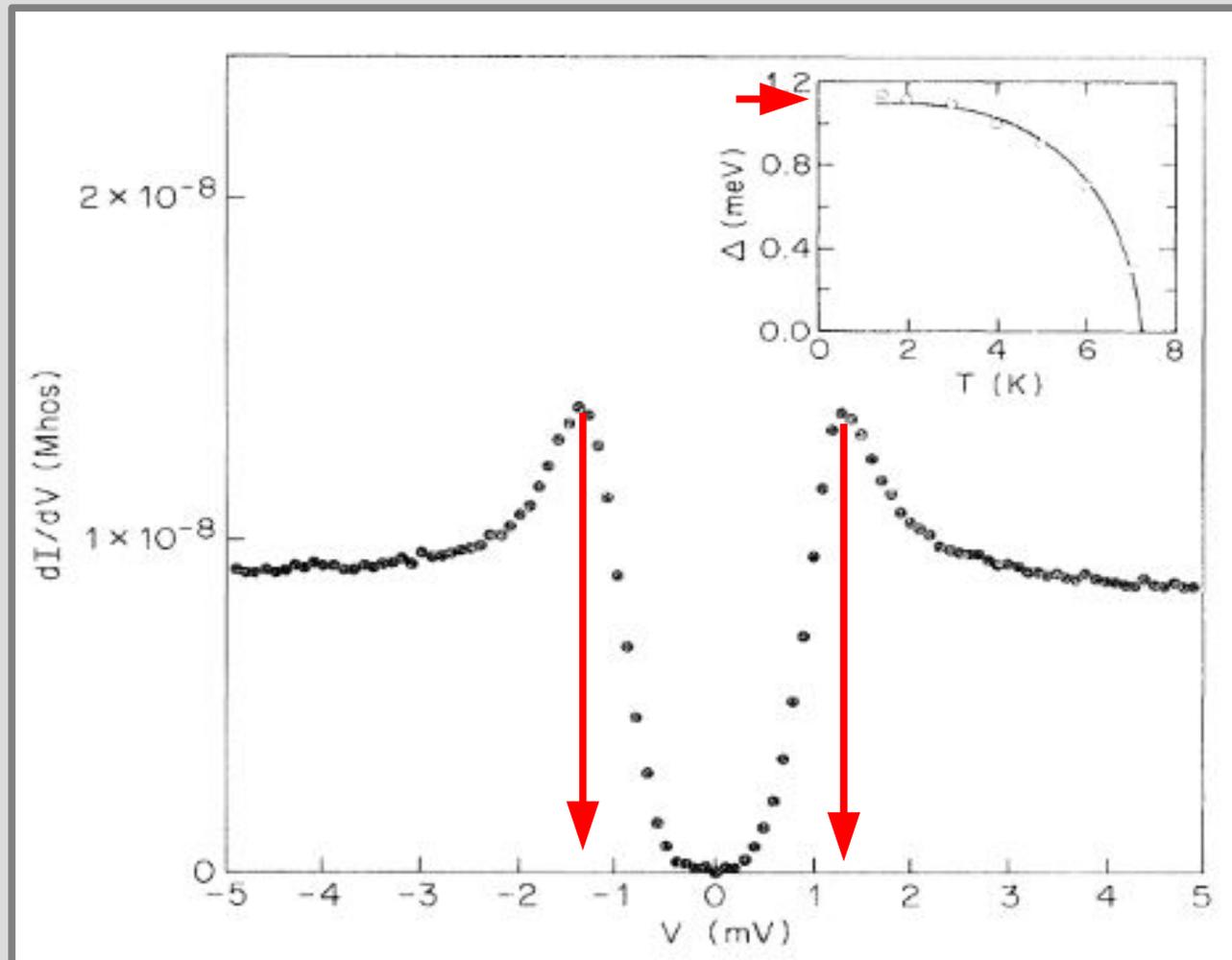
ВАХ туннельных контактов: эксперимент.

Пороговые напряжения $\sim 1\text{mV}$
(соответствуют энергиям $\sim 10\text{K}$)



Кривые вольт-амперной характеристики туннельного Al-Al₂O₃-Pb. Температура сверхпроводящего перехода в свинце 7.2K, в алюминии 1.2K. Верхний ряд: алюминий в нормальном состоянии. Слева: при разных температурах. Справа: в разных магнитных полях. Снизу: туннелирование в SIS-переходе при температуре ниже температуры сверхпроводящего перехода в алюминии, в масштабе рисунка виден только пик, связанный с переходами термоактивированных возбуждений. Из нобелевской лекции Гьявера

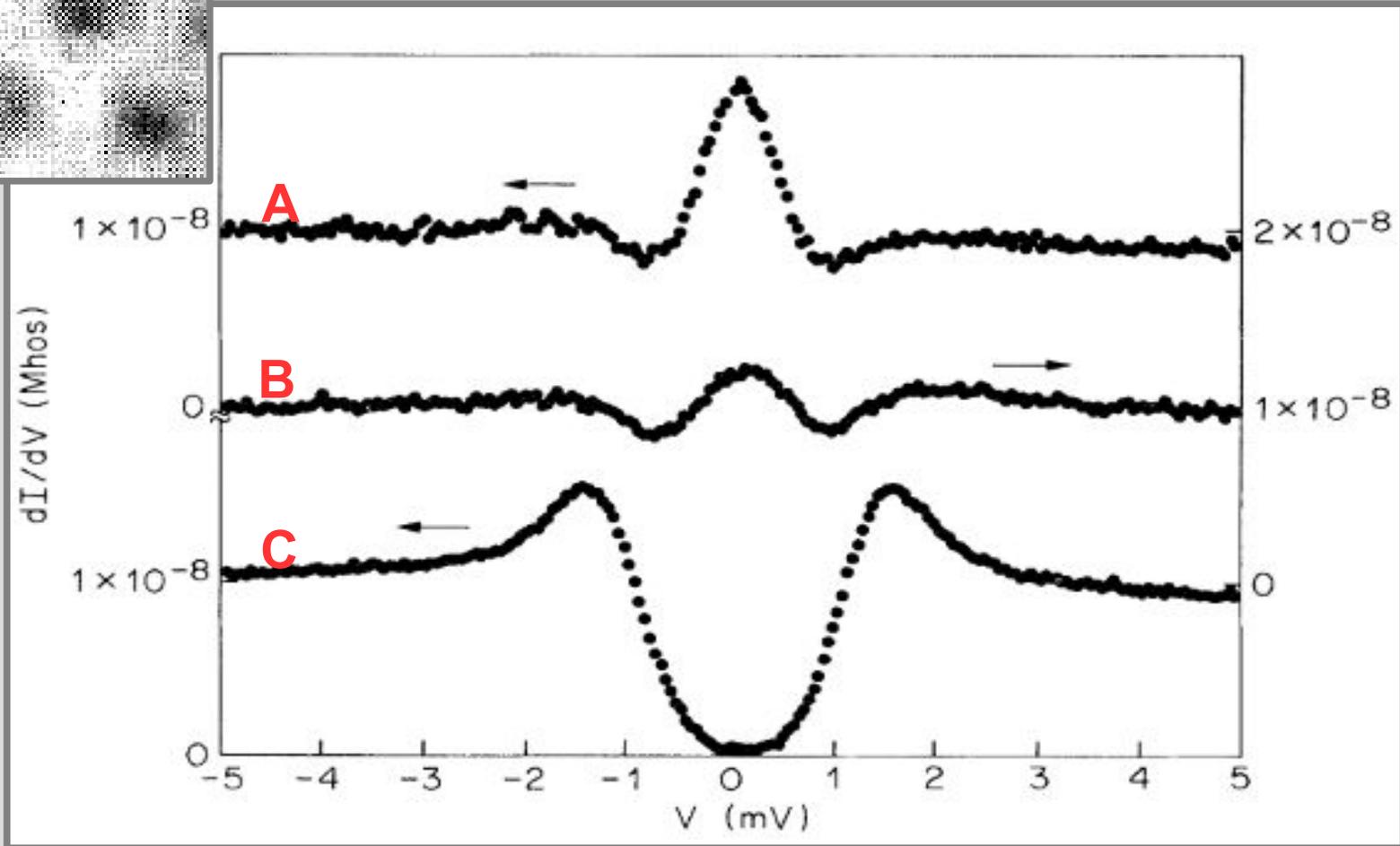
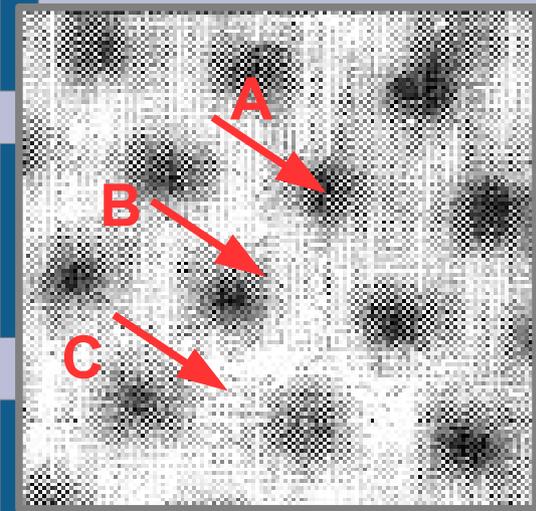
Дифференциальная проводимость SIN-контакта и измерение щели



Производная вольт-амперной характеристики туннельного NIS-перехода между иглой туннельного микроскопа и образцом сверхпроводящего NbSe₂. Внешнее магнитное поле $B=0$, температура 1.45K. На вставке: зависимость щели от температуры.

H. F. Hess, R. B. Robinson, R. C. Dynes, J. M. Valles, Jr., and J. V. Waszczak, Scanning-Tunneling-Microscope Observation of the Abrikosov Flux Lattice and the Density of States near and inside a Fluxoid, *Physical Review Letters*, 62, 214 (1989)

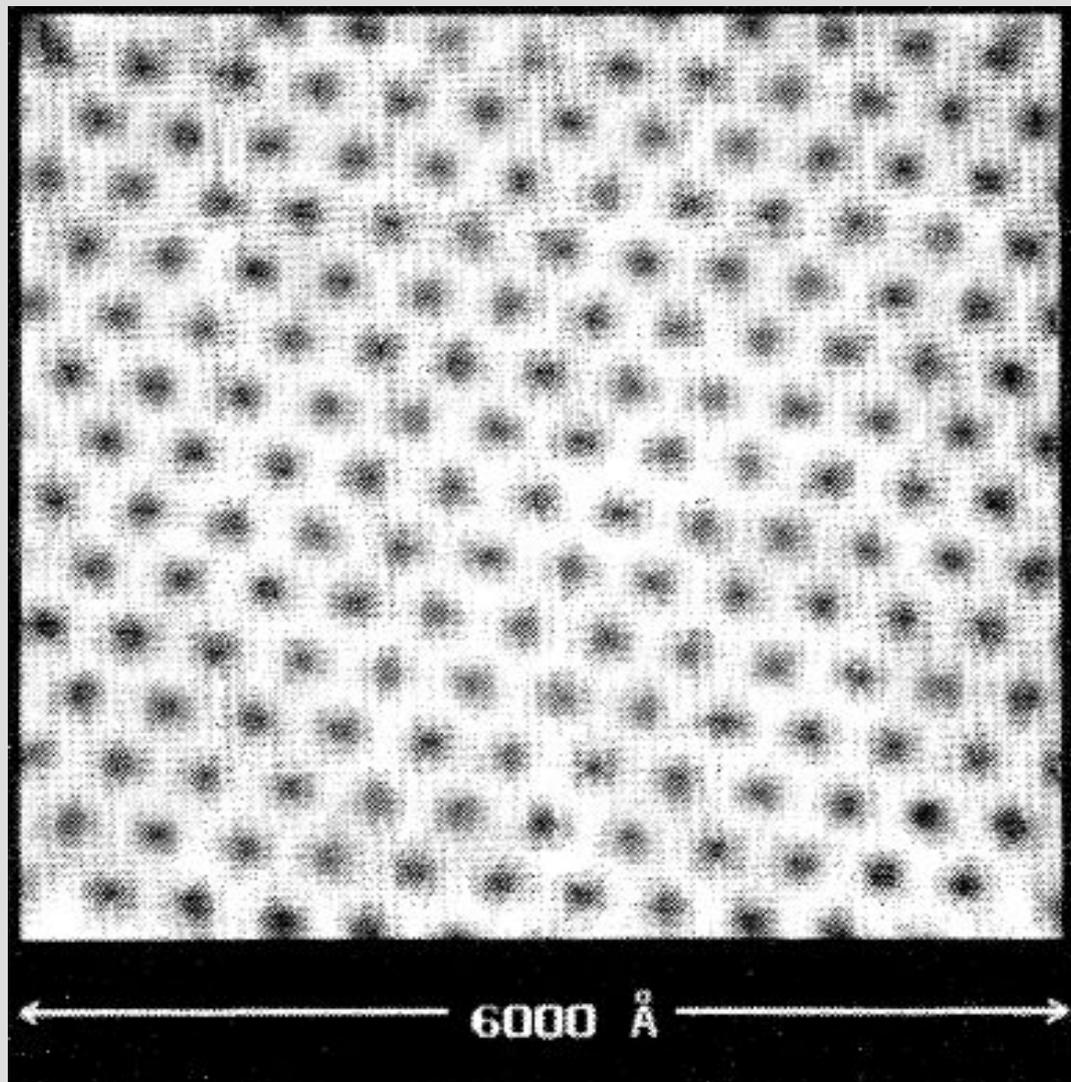
Дифференциальная проводимость туннельного контакта в окрестности вихря.



Производная вольт-амперной характеристики туннельного NS-перехода между иглой туннельного микроскопа и образцом сверхпроводящего NbSe₂ в разных точках. Верхняя кривая: центр вихря, средняя кривая: на расстоянии 75 Å от центра вихря, нижняя кривая: на расстоянии 2000 Å от вихря. Внешнее поле 0.02 Тл, температура 1.85 К. Кривые сдвинуты вертикально для наглядности, постоянный уровень на больших напряжениях одинаков для всех кривых. Особенности плотности состояний в сердцевине вихря вероятно связаны с тем, что движение электронов в коре вихря вообще говоря ограничено в поперечном направлении границей с нормальной фазой, что приводит к некоторым эффектам типа размерного квантования.

H. F. Hess, R. B. Robinson, R. C. Dynes, J. M. Valles, Jr., and J. V. Waszczak, Scanning-Tunneling-Microscope Observation of the Abrikosov Flux Lattice and the Density of States near and inside a Fluxoid, *Physical Review Letters*, 62, 214 (1989)

«Фотография» вихрей в сверхпроводнике.



Øystein Fischer, Martin Kugler, Ivan Maggio-Aprile, Christophe Berthod, and Christoph Renner, Scanning tunneling spectroscopy of high-temperature superconductors, *Review of Modern Physics*, 79, 353 (2007)

вихревая решётка в NbSe₂ в поле 1Тл при температуре 1.8К.

H. F. Hess, R. B. Robinson, R. C. Dynes, J. M. Valles, Jr., and J. V. Waszczak, Scanning-Tunneling-Microscope Observation of the Abrikosov Flux Lattice and the Density of States near and inside a Fluxoid, *Physical Review Letters*, 62, 214 (1989)

Кинохроника вихрей

Контакты полупроводников



The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 3

Leo Esaki - Facts



Leo Esaki

Born: 12 March 1925, Osaka, Japan

Affiliation at the time of the award: IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY, USA

Prize motivation: "for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

Field: condensed matter physics, semiconductors

Prize share: 1/4



The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 3

Leo Esaki - Facts



Leo

Bor

Affil

awa

Res

NY,

Priz

exp

tun

sem

sup

Field

sem

Priz

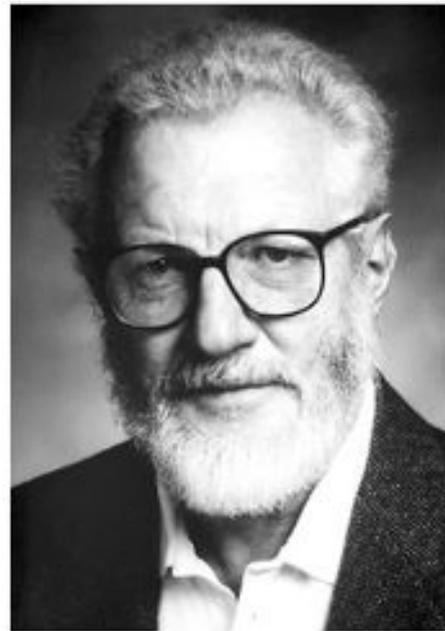


The Nobel Prize in Physics 2000

Zhores Alferov, Herbert Kroemer, Jack Kilby

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 6

Herbert Kroemer - Facts



Herbert Kroemer

Born: 25 August 1928, Weimar, Germany

Affiliation at the time of the award: University of California, Santa Barbara, CA, USA

Prize motivation: "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics"

Field: condensed matter physics, instrumentation

Prize share: 1/4



The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 3

Leo Esaki - Facts



Leo

Bor

Affil

awa

Res

NY,

Priz

exp

tun

sem

sup

Field

sem

Priz

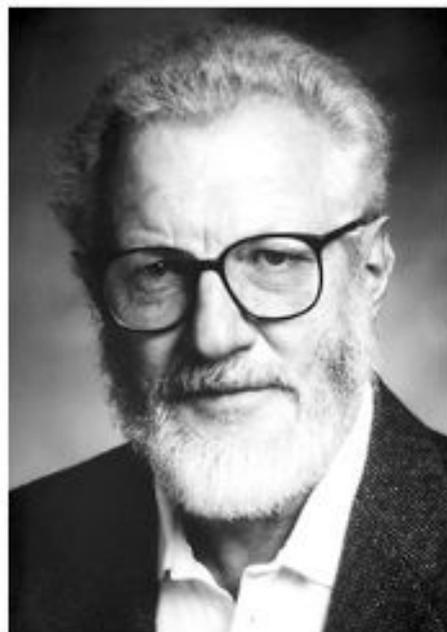


The Nobel Prize in Physics 2000

Zhores Alferov, Herbert Kroemer, Jack Kilby

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 6

Herbert Kroemer



The Nobel Prize in Physics 2000

Zhores Alferov, Herbert Kroemer, Jack Kilby

Share this: [f](#) [G+](#) [t](#) [+](#) [e](#) 11

Zhores Alferov - Facts



Zhores I. Alferov

Born: 15 March 1930, Vitebsk, Belorussia, USSR (now Belarus)

Affiliation at the time of the award: A.F. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg, Russia

Prize motivation: "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics"

Field: condensed matter physics, instrumentation

Prize share: 1/4



The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

Share this: 3

Leo Esaki - Facts



Leo
Bor
Affil
awa
Res
NY,
Priz
exp
tun
sem
sup
Fiel
sem
Priz

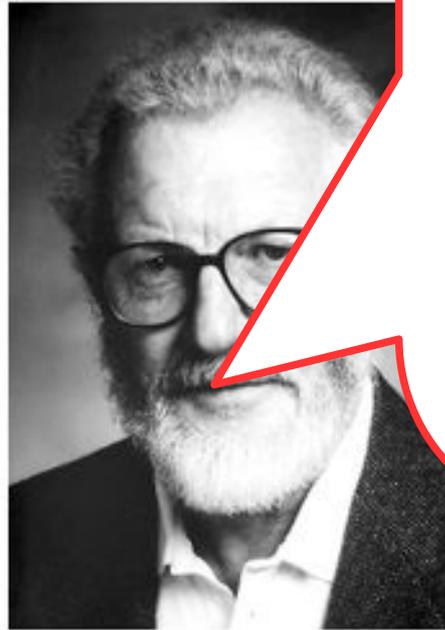


The Nobel Prize in Physics

Zhores Alferov, Herbert Kroemer

Share this:

Herbert Kroemer



Whenever I teach my semiconductor device course, one of the central messages I try to get across early is the importance of energy band diagrams. I often put this in the form of «Kroemer's Lemma of Proven Ignorance»:

- *If, in discussing a semiconductor problem you cannot draw an **Energy Band Diagram**, this shows that you don't know what you are talking about with the corollary.*
- *If you can draw one, but don't, then your audience won't know what you are talking about.*

H.Kroemer, Nobel Prize Lecture, 2000



Prize motivation: "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics"

Field: condensed matter physics, instrumentation

Prize share: 1/4



The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

Share this: 3

Leo Esaki - Facts



Leo
Bor
Affil
awa
Res
NY,
Priz
exp
tun
sem
sup
Fiel
sem
Priz

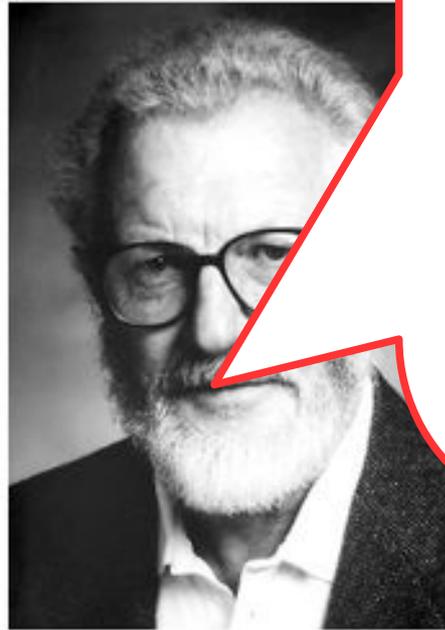


The Nobel Prize in Physics

Zhores Alferov, Herbert Kroemer

Share this:

Herbert Kroemer



Whenever I teach my semiconductor device course, one of the central messages I try to get across early is the importance of energy band diagrams. I often put this in the form of «Kroemer's Lemma of Proven Ignorance»:

- *If, in discussing a semiconductor problem you cannot draw an **Energy Band Diagram**, this shows that you don't know what you are talking about with the corollary.*
- *If you can draw one, but don't, then your audience won't know what you are talking about.*

H.Kroemer, Nobel Prize Lecture, 2000



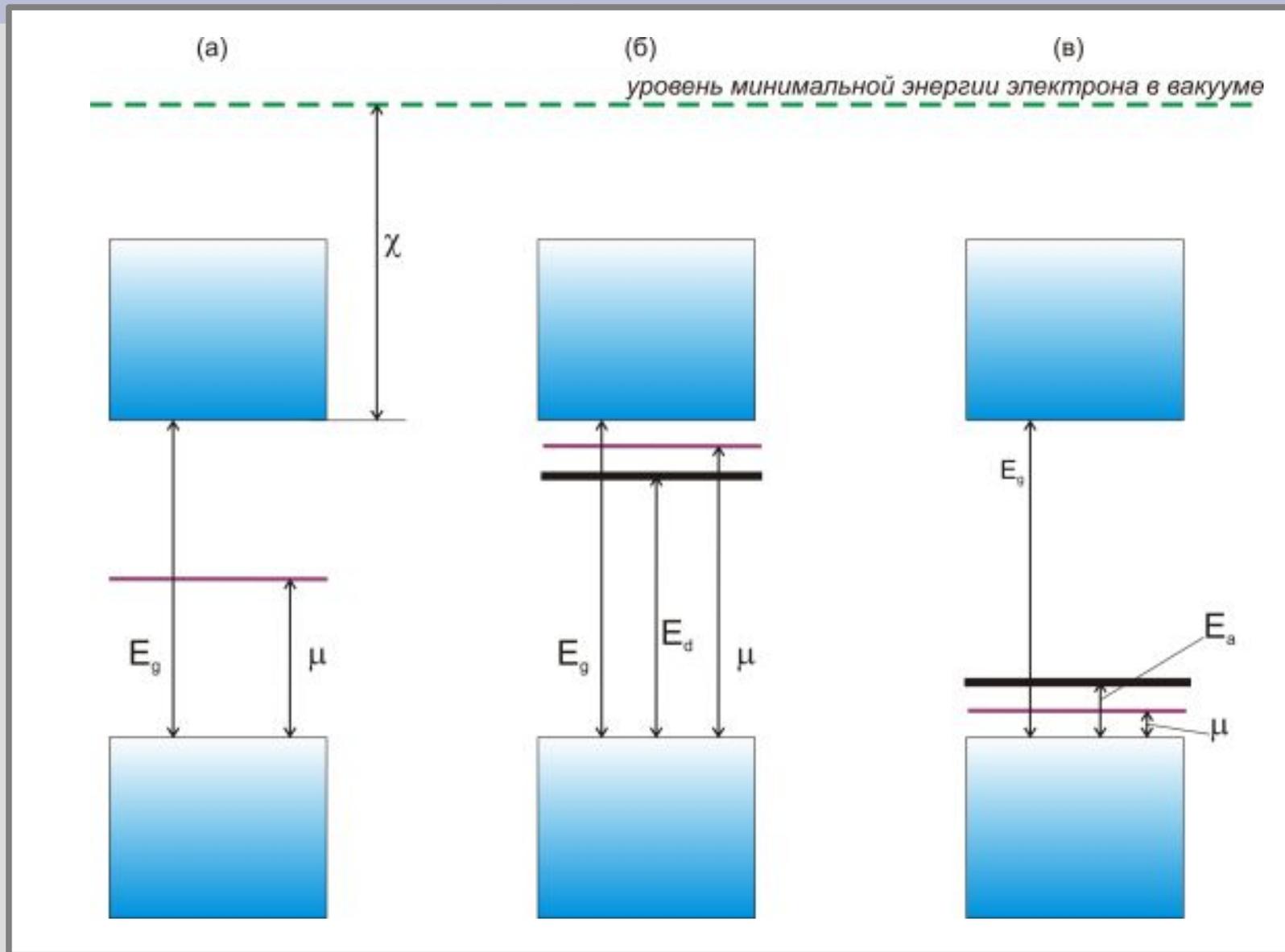
Prize motivation: "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics"

Field: condensed matter physics, instrumentation

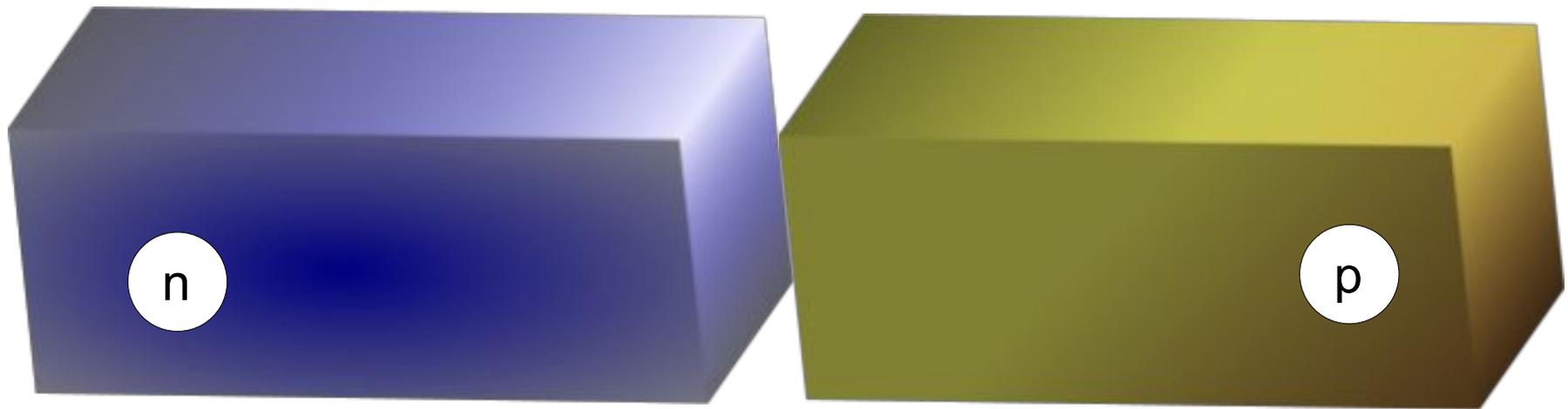
Prize share: 1/4

Часть 1. Энергетическая диаграмма p-n перехода

Энергетическая диаграмма полупроводника



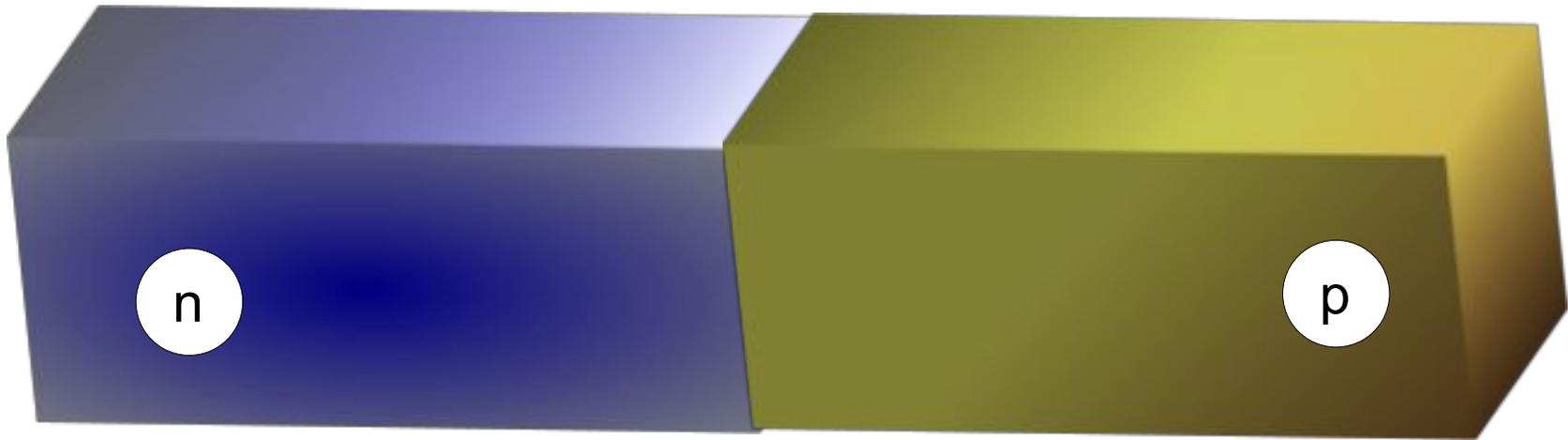
p-n переход



Упрощённая геометрия:

- два «бруска» полупроводника p и n-типа
- гладкая граница
- один «родительский» полупроводник, одинаковое расположение зон.

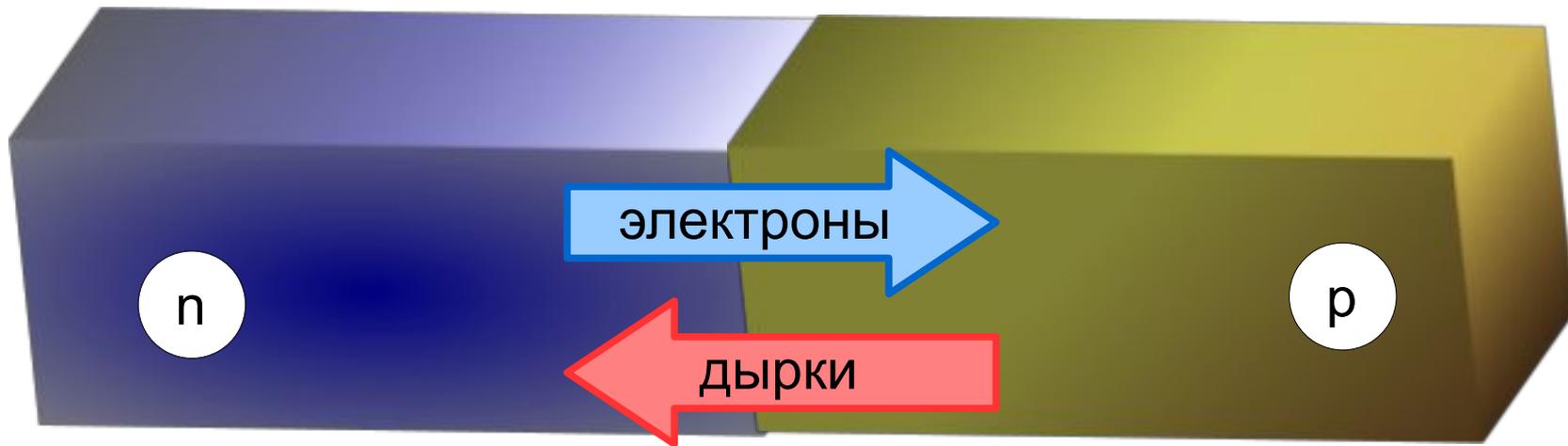
p-n переход



Упрощённая геометрия:

- два «бруска» полупроводника p и n-типа
- гладкая граница
- один «родительский» полупроводник, одинаковое расположение зон.

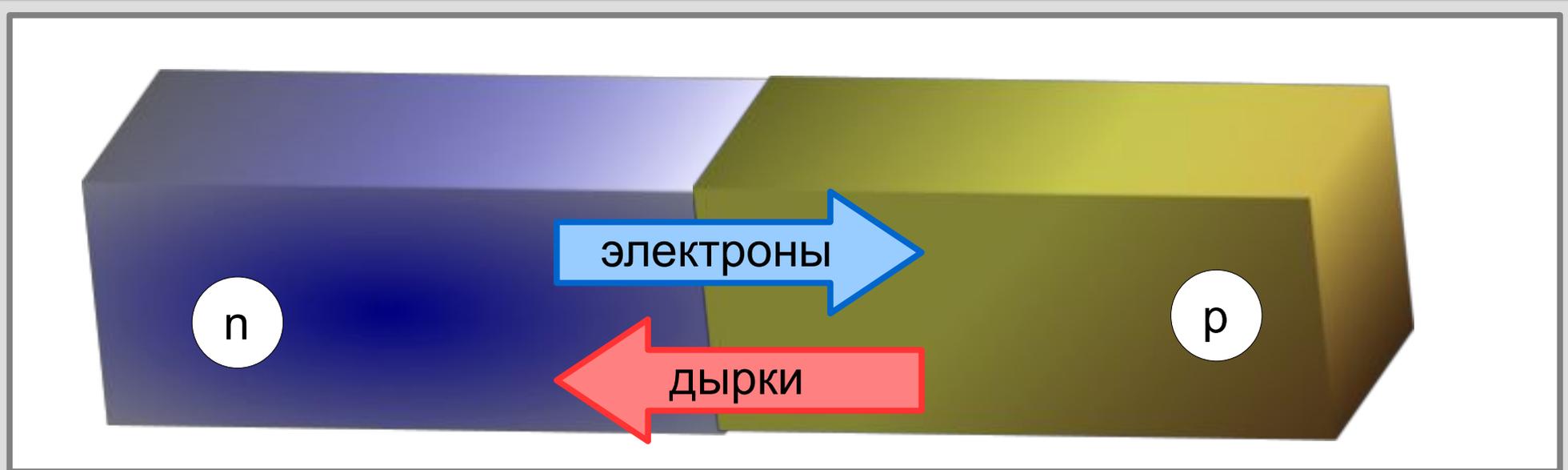
p-n переход



Упрощённая геометрия:

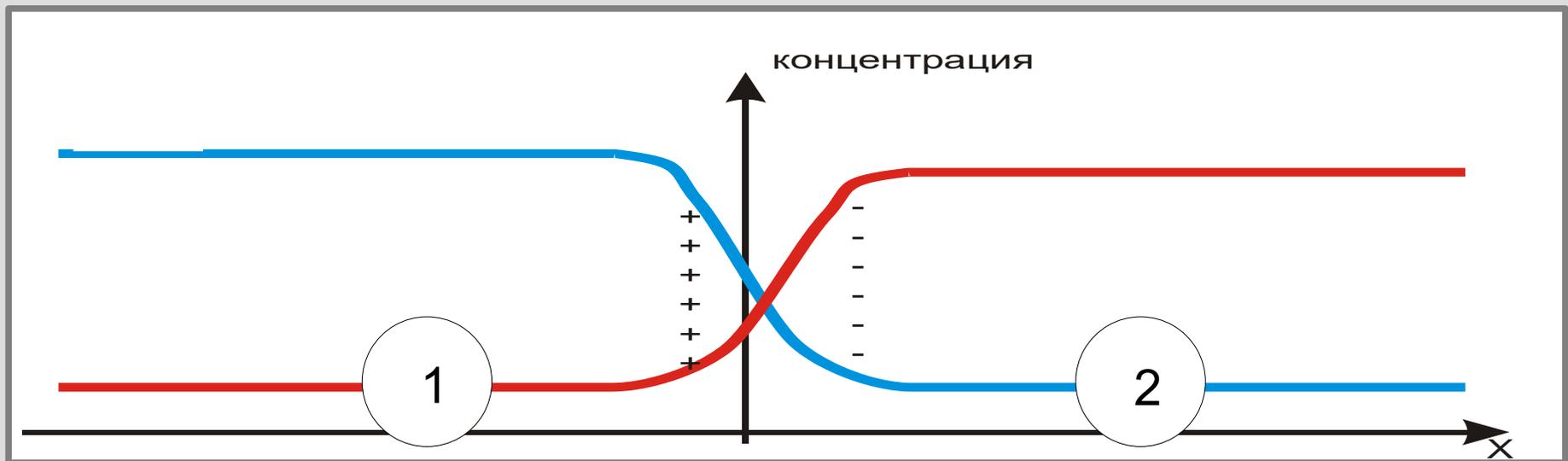
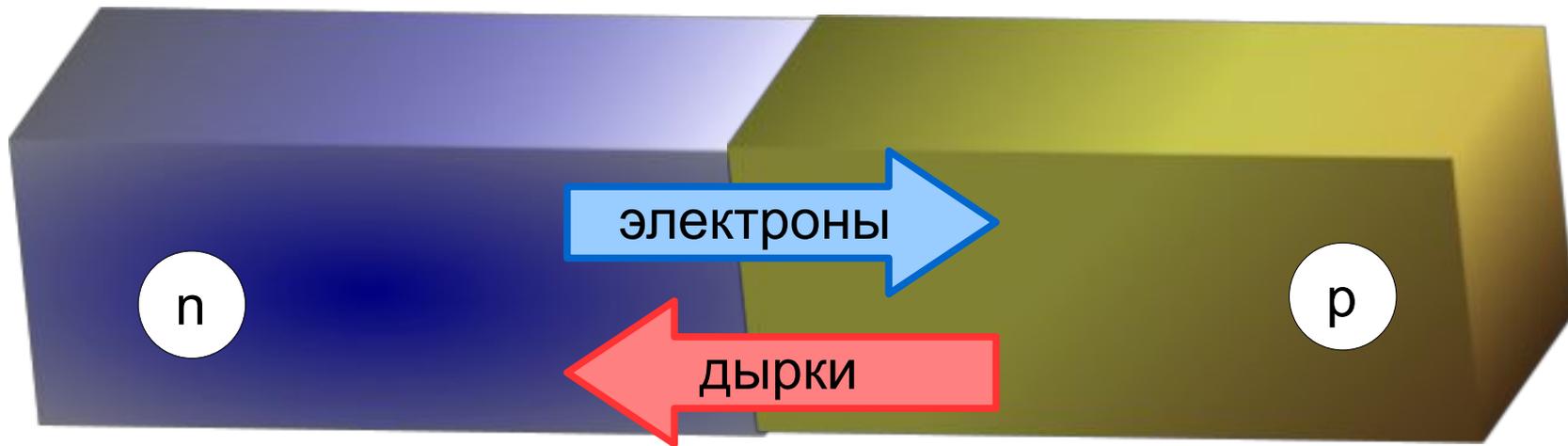
- два «бруска» полупроводника p и n-типа
- гладкая граница
- один «родительский» полупроводник, одинаковое расположение зон.

Условия равновесия на p-n переходе

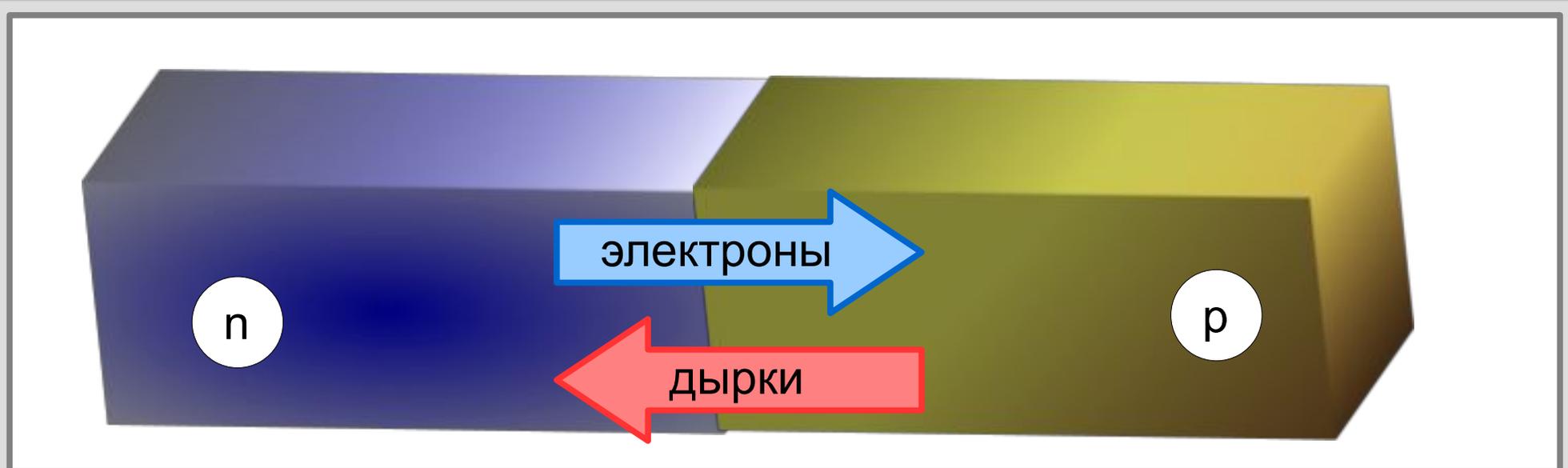


$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$

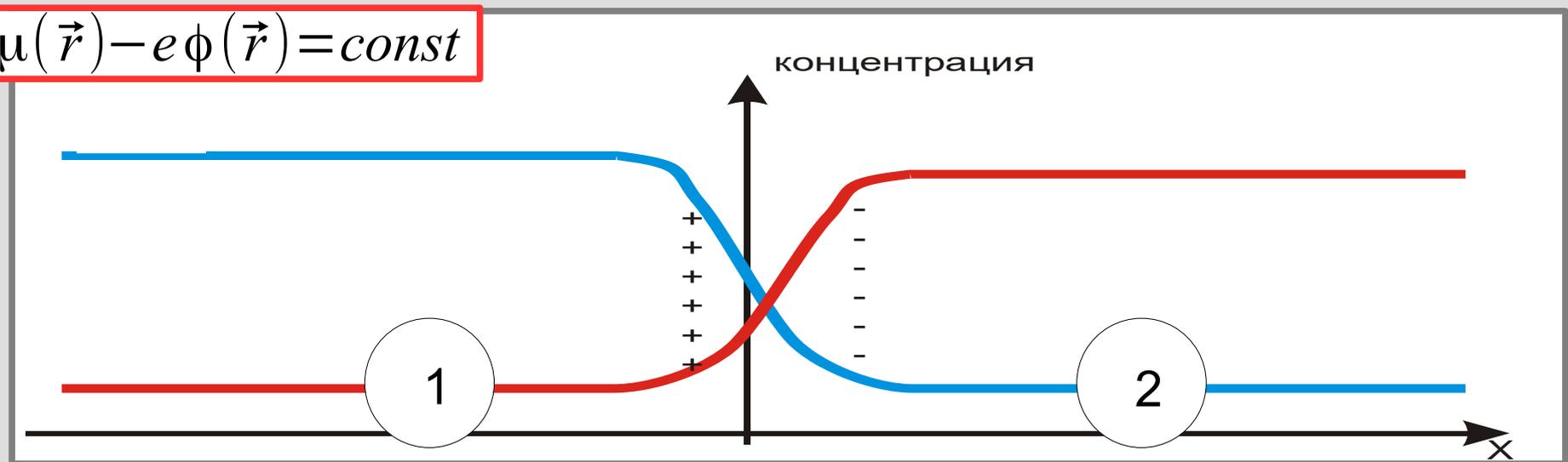
Условия равновесия на p-n переходе



Условия равновесия на p-n переходе



$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$



Энергетическая диаграмма p-n перехода.

а)

зона проводимости

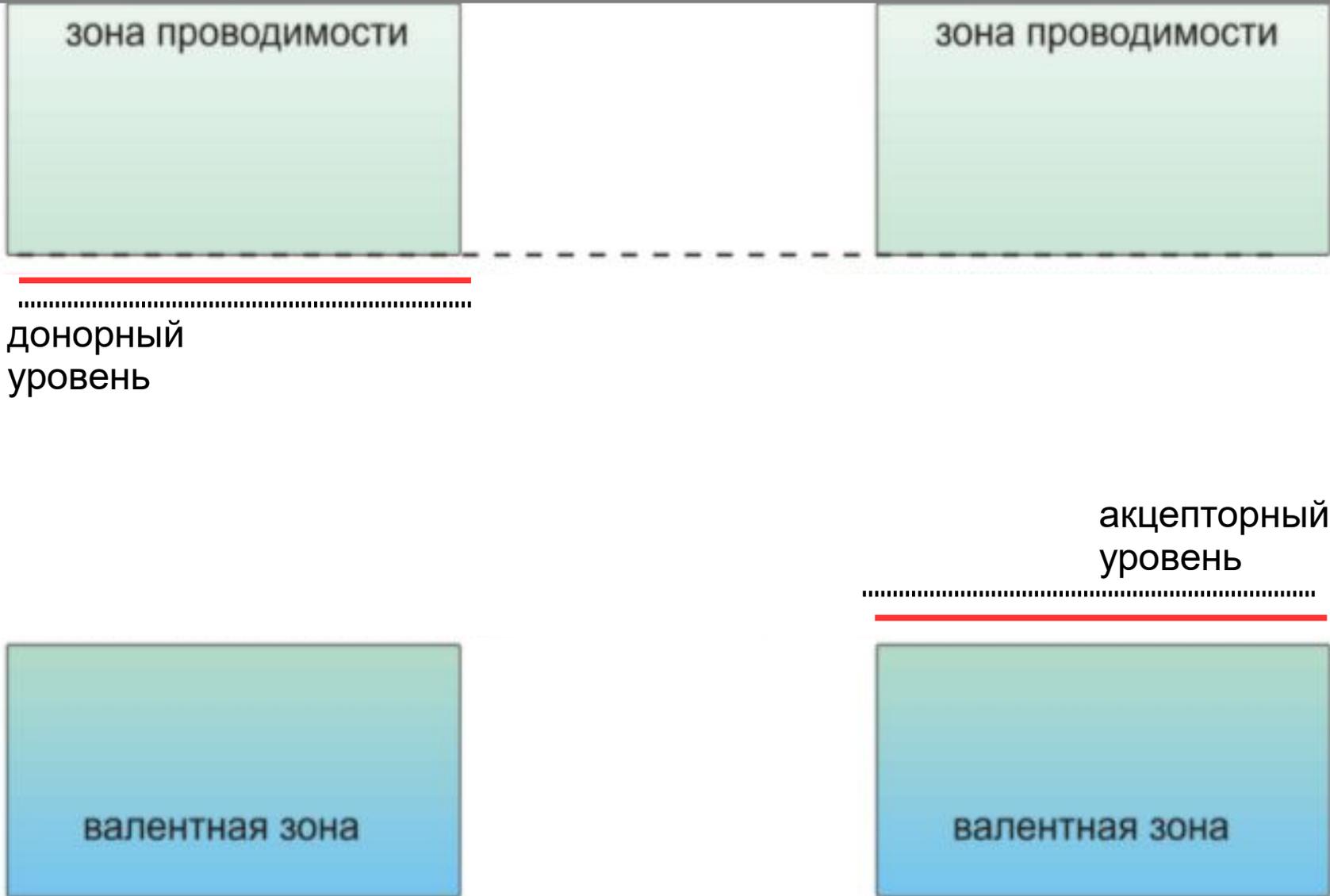
зона проводимости

донорный
уровень

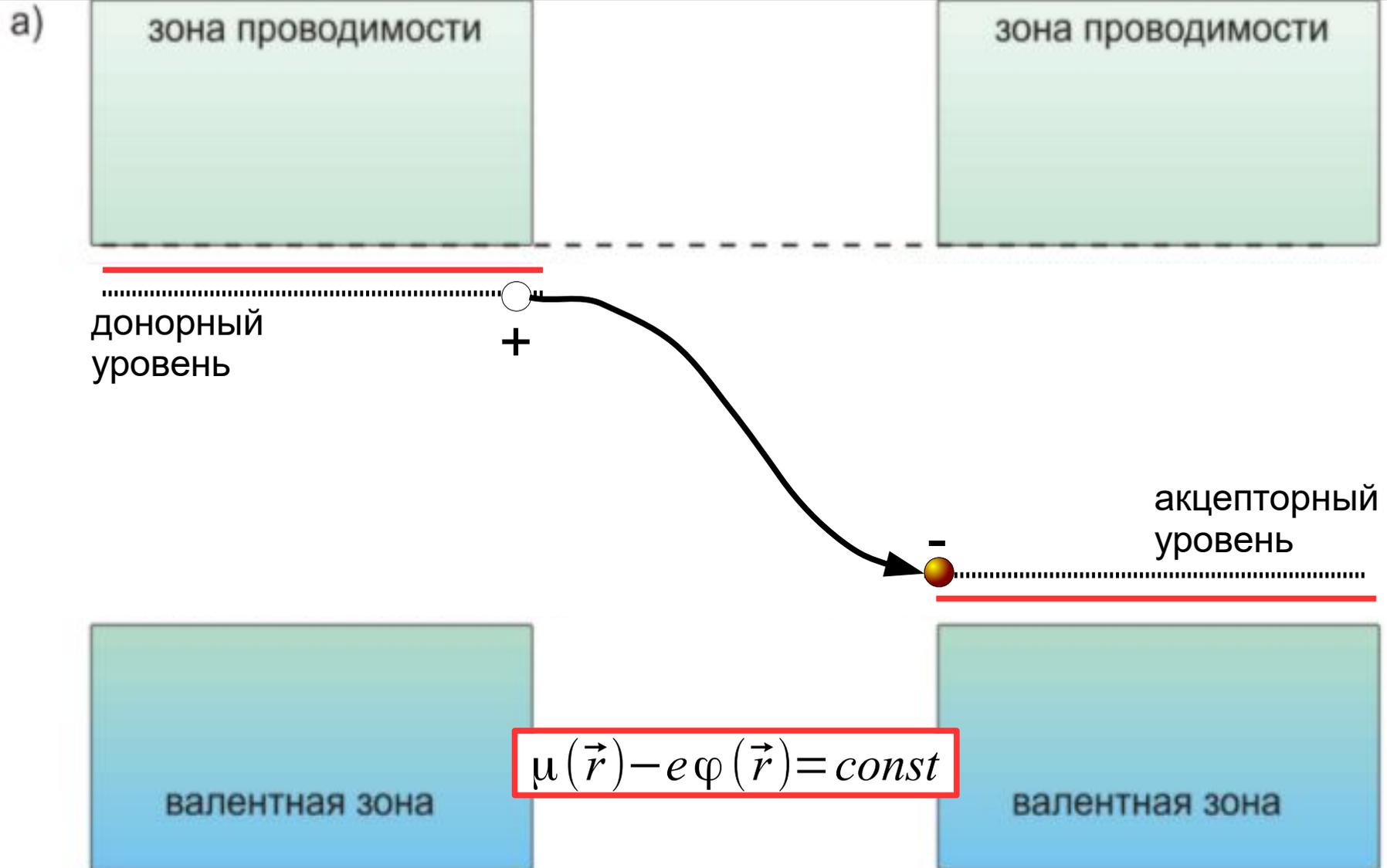
акцепторный
уровень

валентная зона

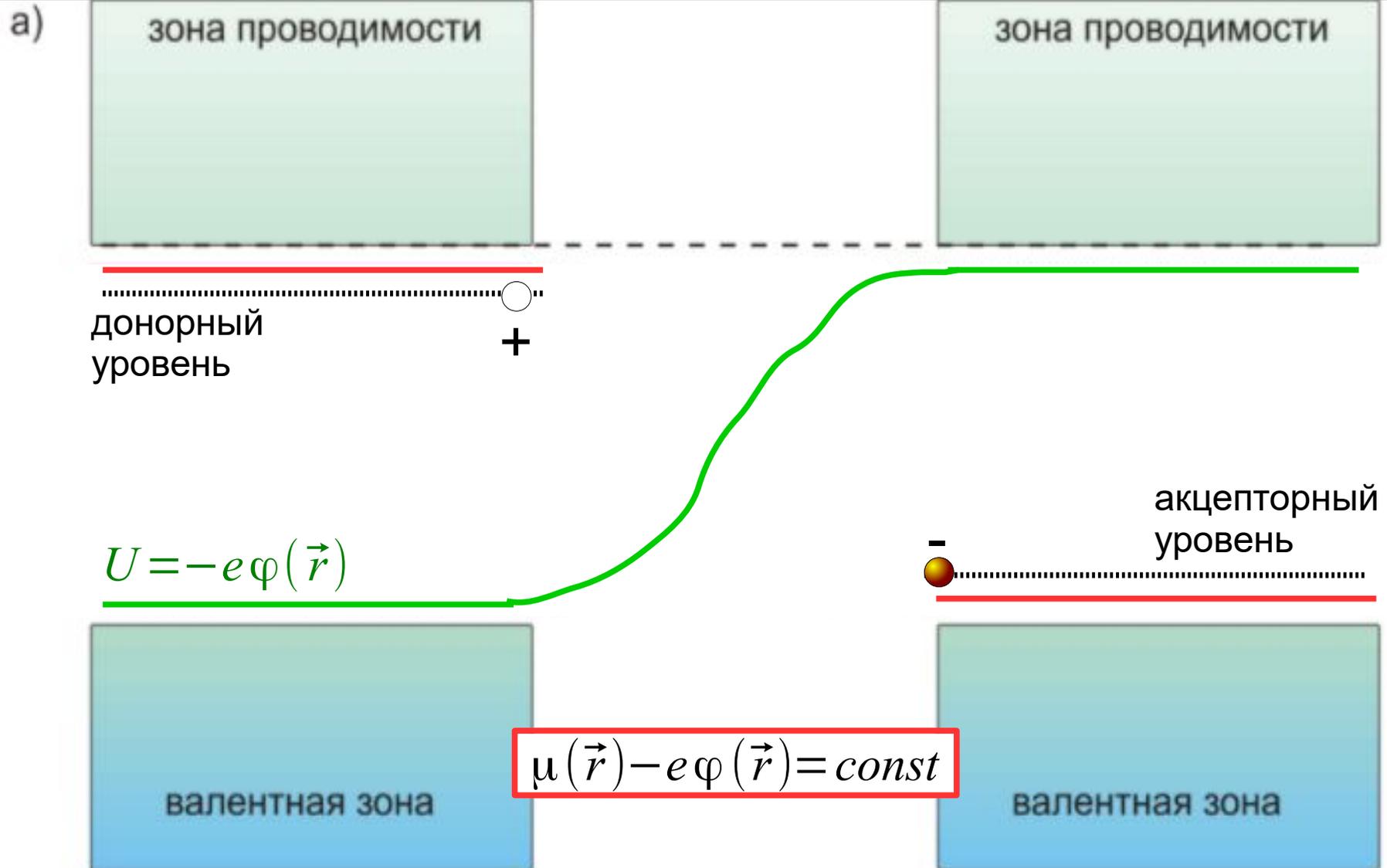
валентная зона



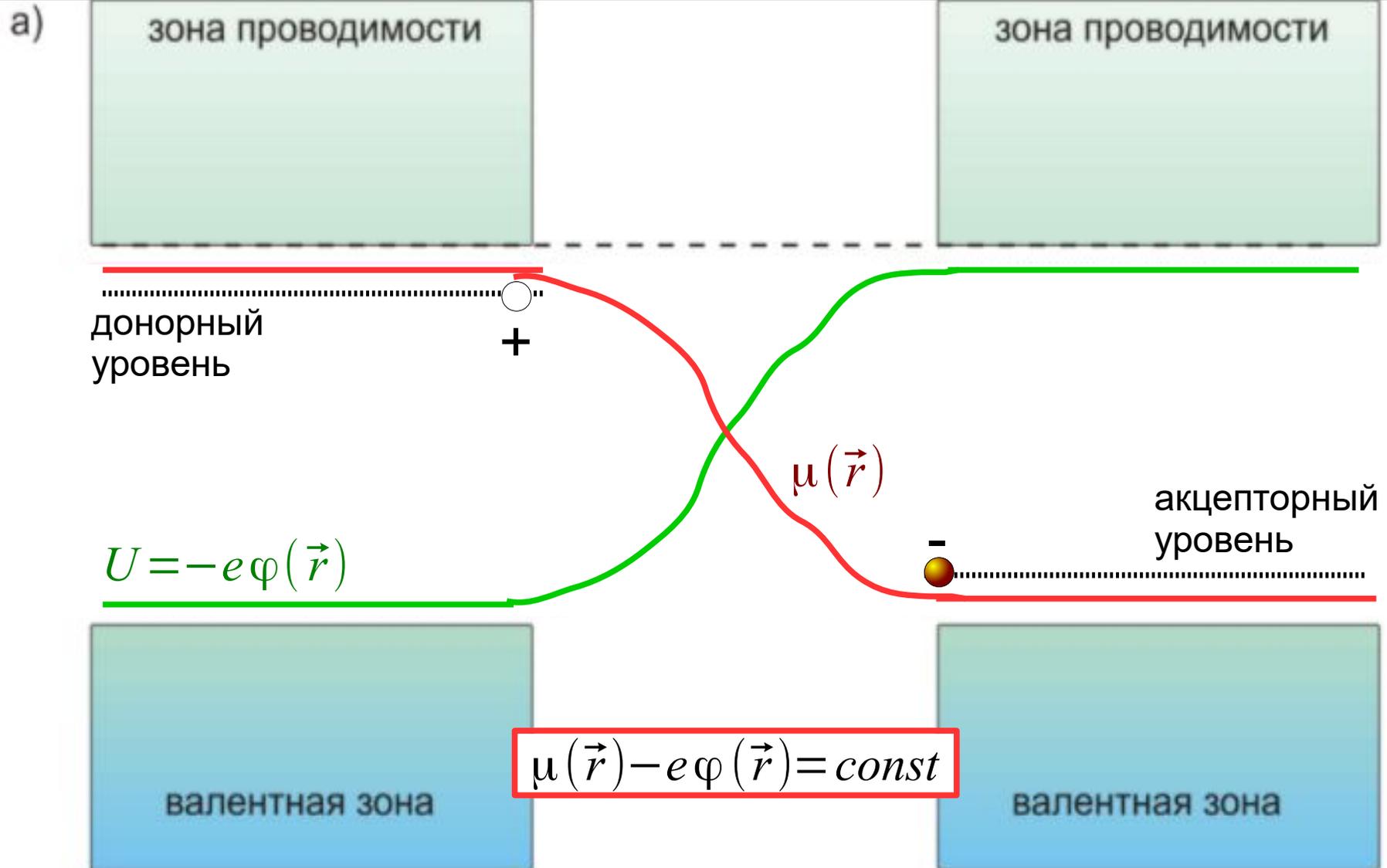
Энергетическая диаграмма p-n перехода.



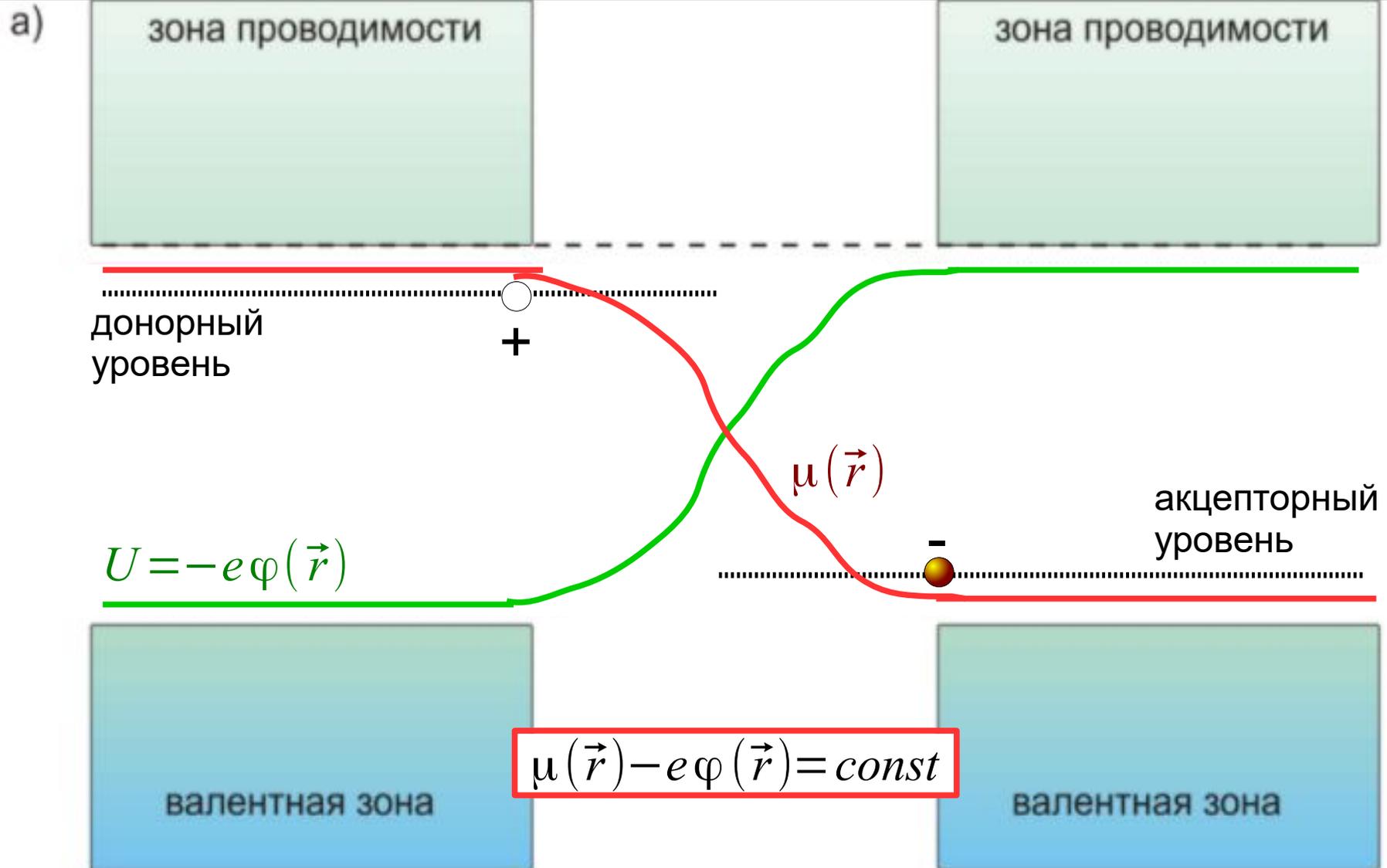
Энергетическая диаграмма p-n перехода.



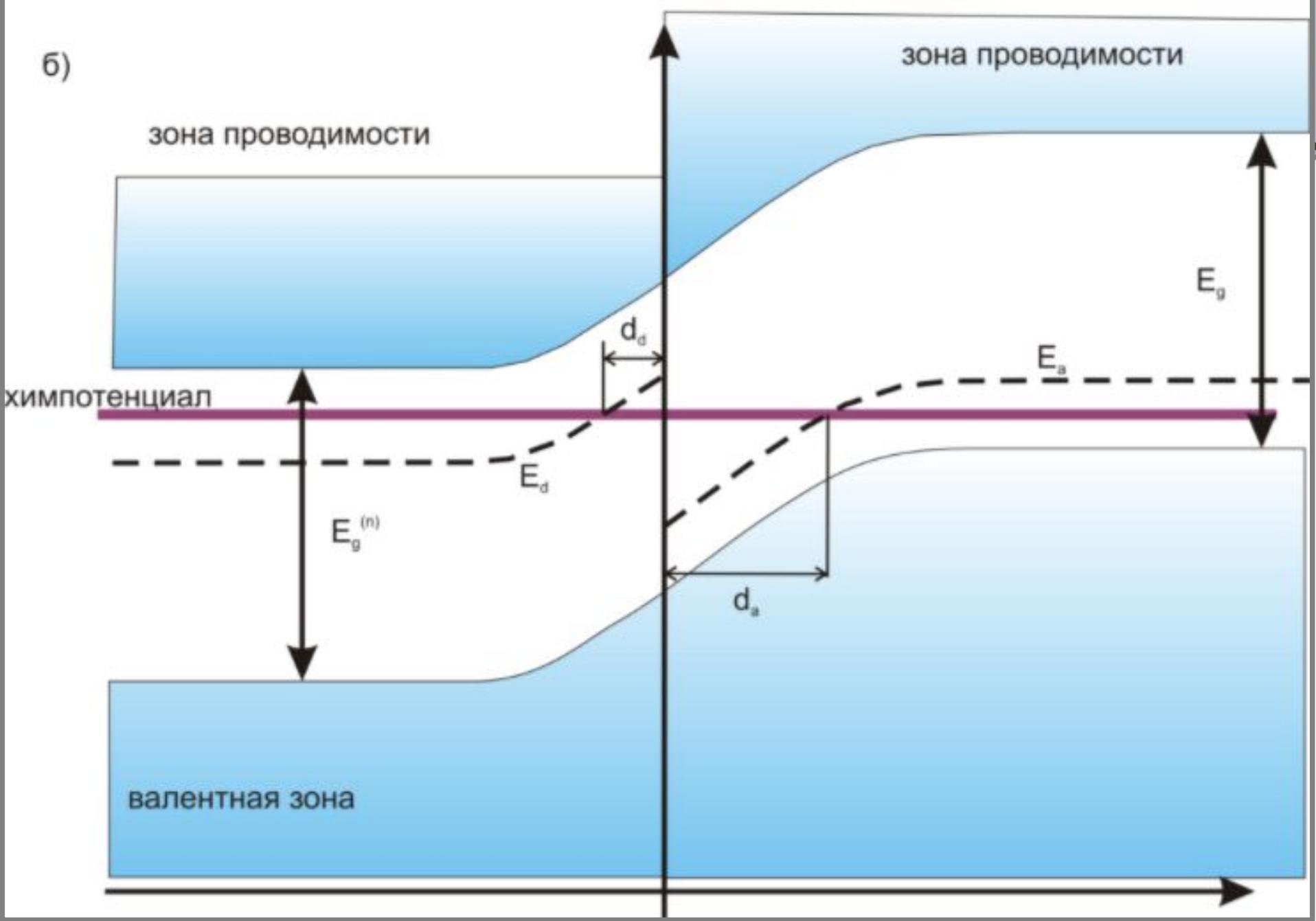
Энергетическая диаграмма p-n перехода.



Энергетическая диаграмма p-n перехода.

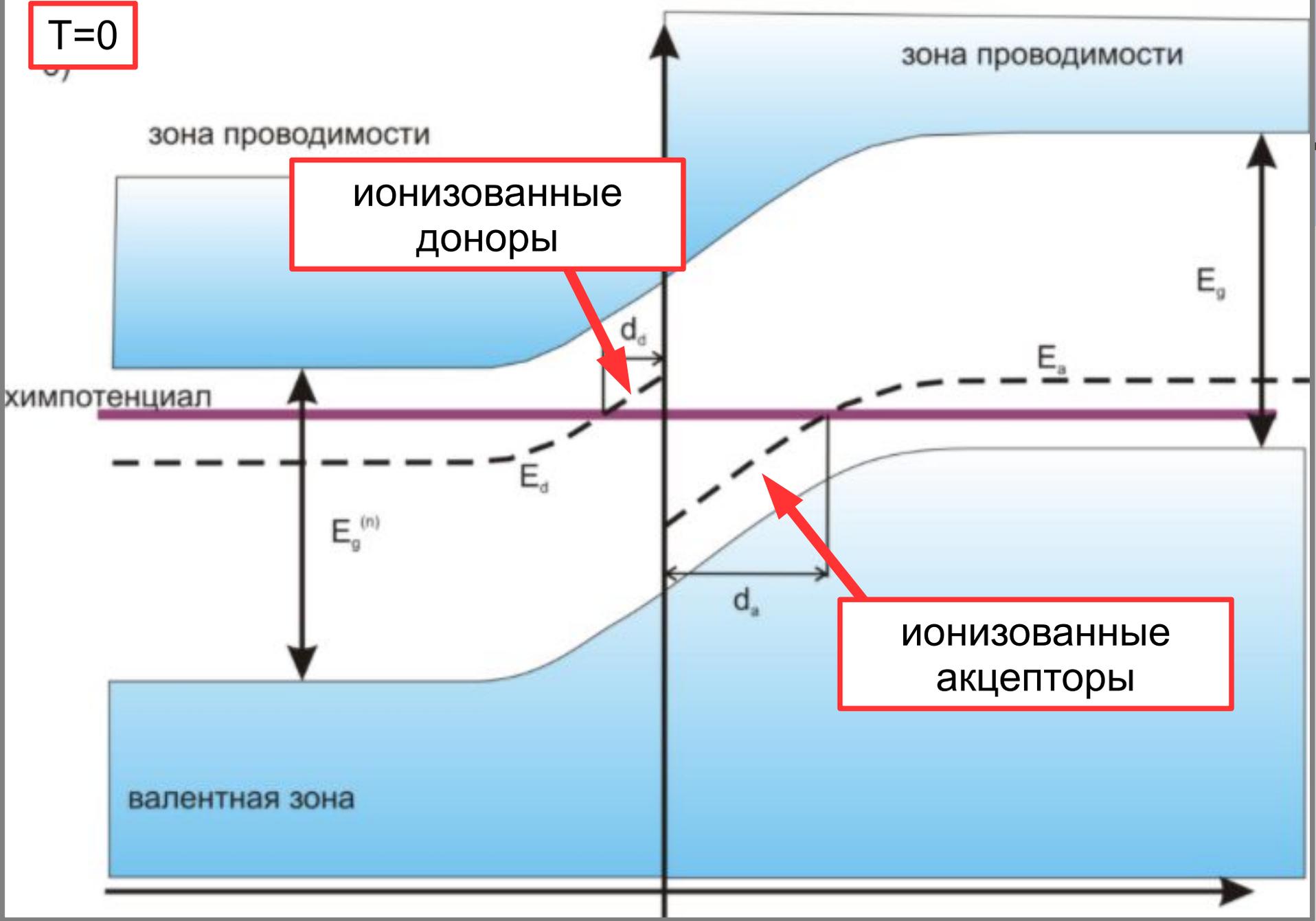


б)



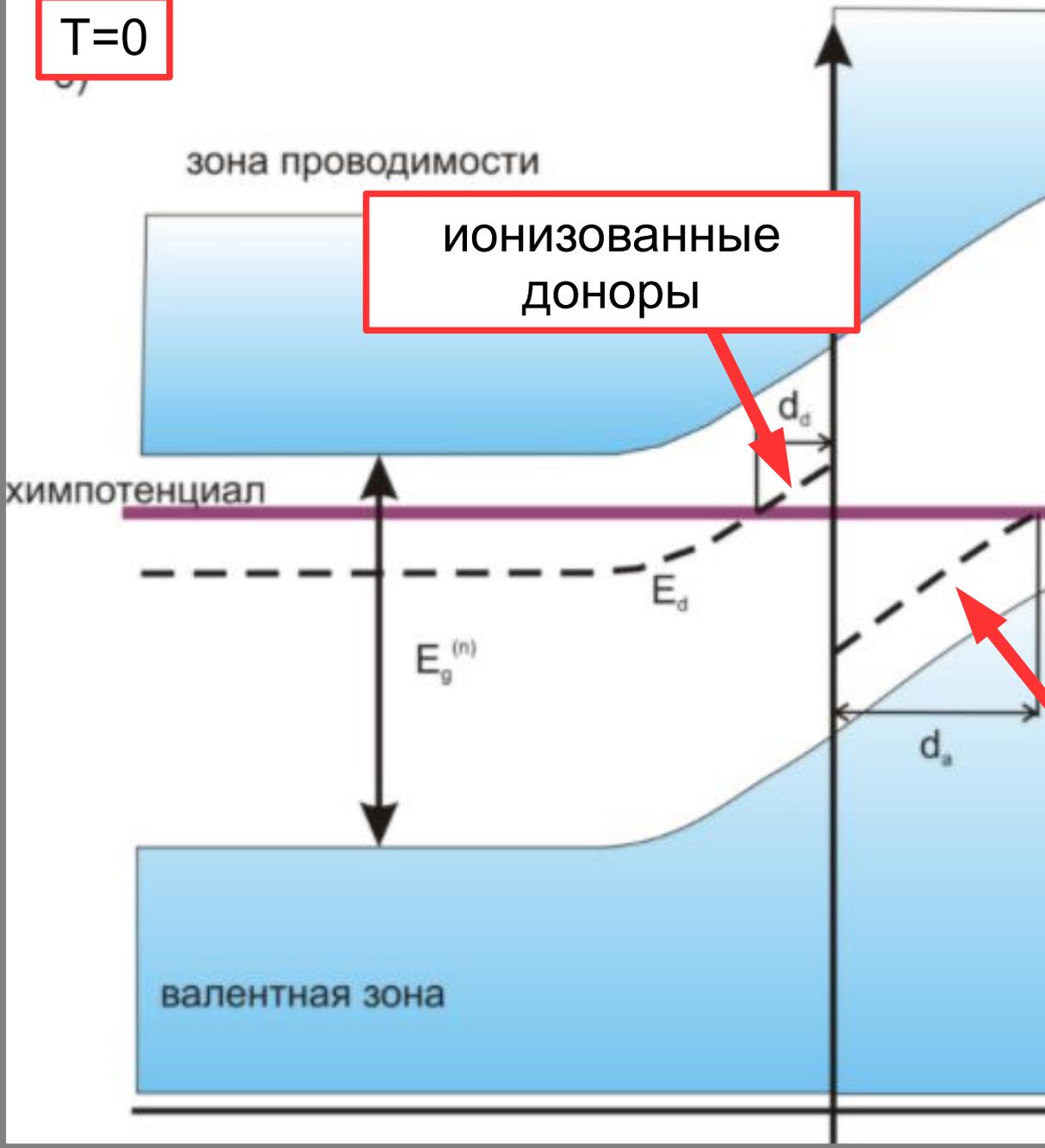
$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$

$T=0$



$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$

$T=0$



Электронейтральность:
 $d_a N_a = d_d N_d$

$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$

$T=0$

зона проводимости

ИОНИЗОВАННЫЕ
ДОНОРЫ

химпотенциал

E_d

$E_g^{(n)}$

валентная зона

d_a

d_d

Электронейтральность:

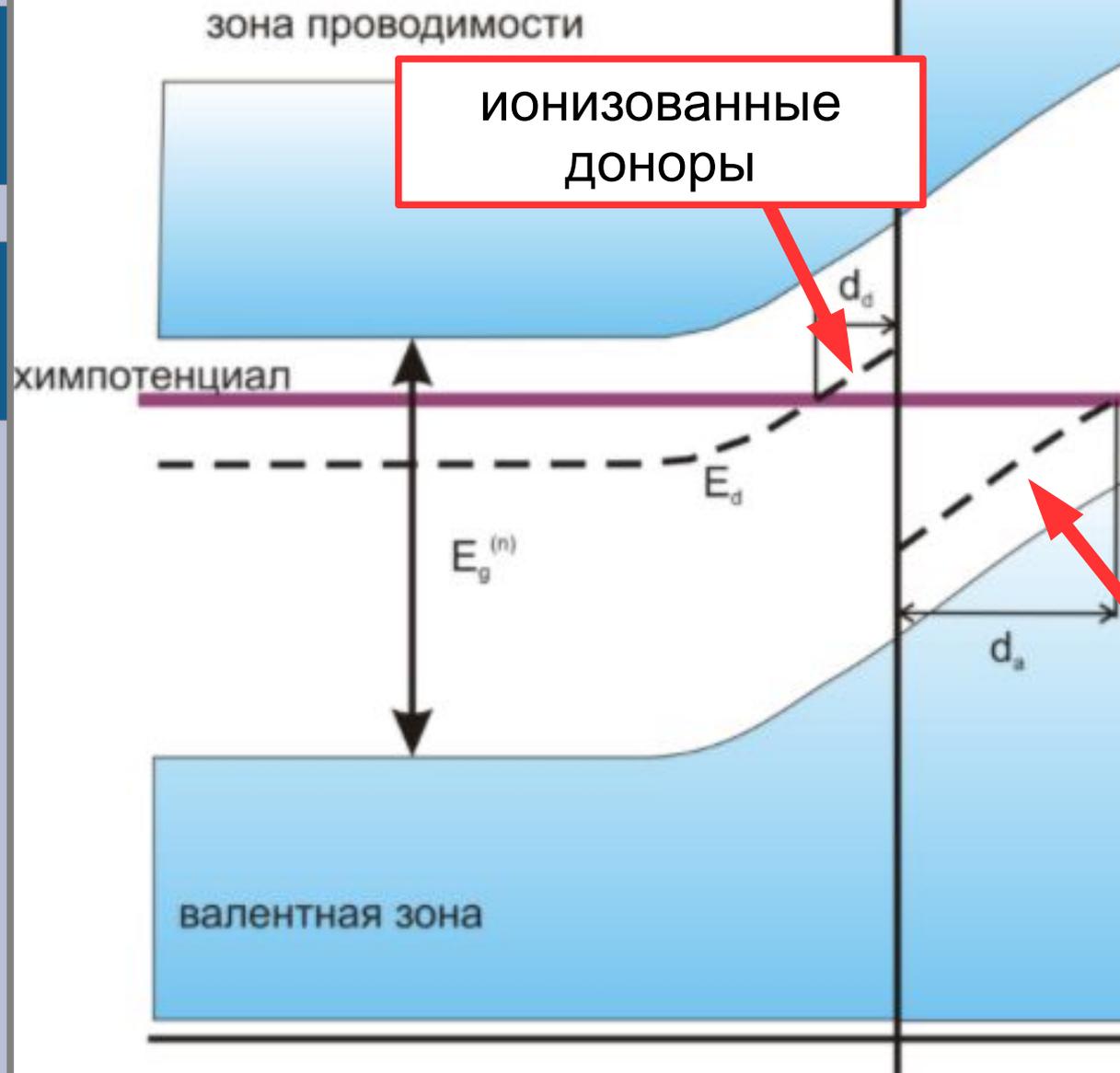
$$d_a N_a = d_d N_d$$

Контактная разность потенциалов:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi = \varphi_d - \varphi_a &= \frac{1}{e} (\mu_d - \mu_a) = \\ &= \frac{E_g + E_d - E_a}{2e} \approx \frac{E_g}{e} \end{aligned}$$

$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$

$T=0$



Электронейтральность:

$$d_a N_a = d_d N_d$$

Контактная разность потенциалов:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi = \varphi_d - \varphi_a &= \frac{1}{e} (\mu_d - \mu_a) = \\ &= \frac{E_g + E_d - E_a}{2e} \approx \frac{E_g}{e} \end{aligned}$$

Уравнения на потенциал:

$$\varepsilon \frac{d^2 \varphi}{d x^2} = -4 \pi e N_d$$

$$\varepsilon \frac{d^2 \varphi}{d x^2} = 4 \pi e N_a$$

$$\mu(\vec{r}) - e \phi(\vec{r}) = const$$

$T=0$

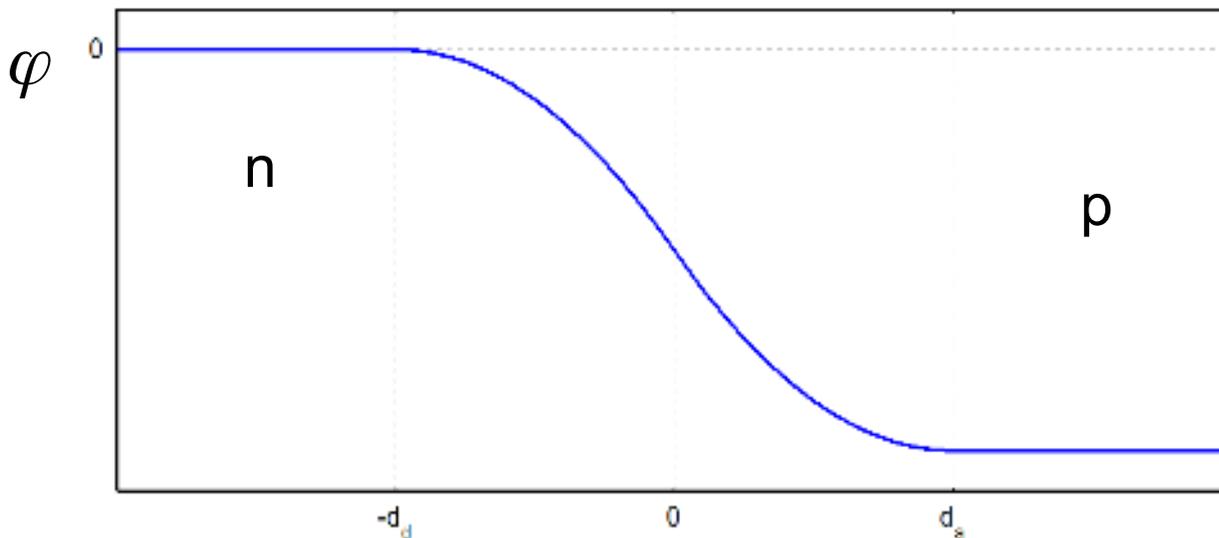


Электронейтральность:

$$d_n N_a = d_p N_d$$

Контактная разность потенциалов:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi = \varphi_d - \varphi_a &= \frac{1}{e} (\mu_d - \mu_a) = \\ &= \frac{E_g + E_d - E_a}{2e} \approx \frac{E_g}{e} \end{aligned}$$



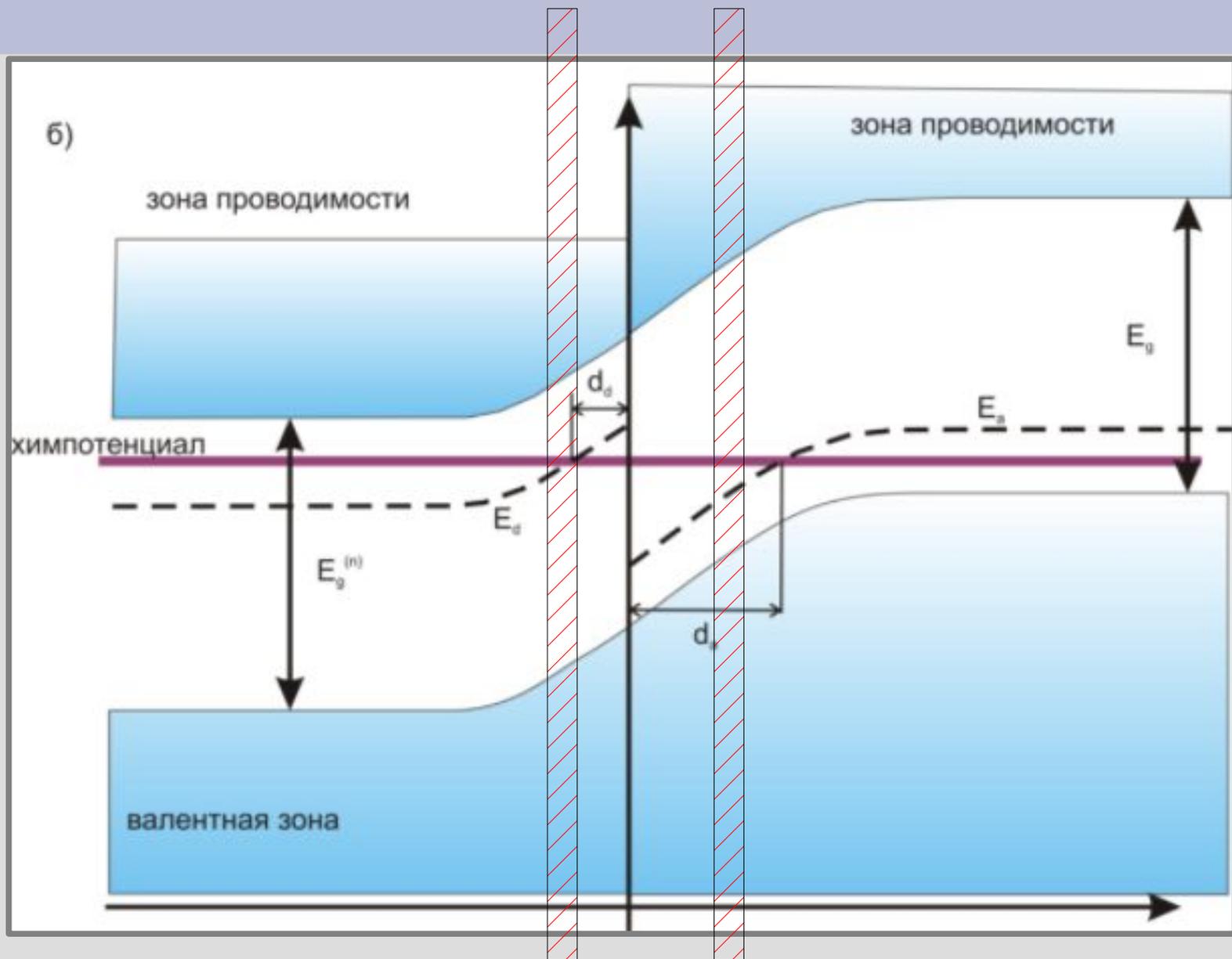
Уравнения на потенциал:

$$\varepsilon \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -4\pi e N_d$$

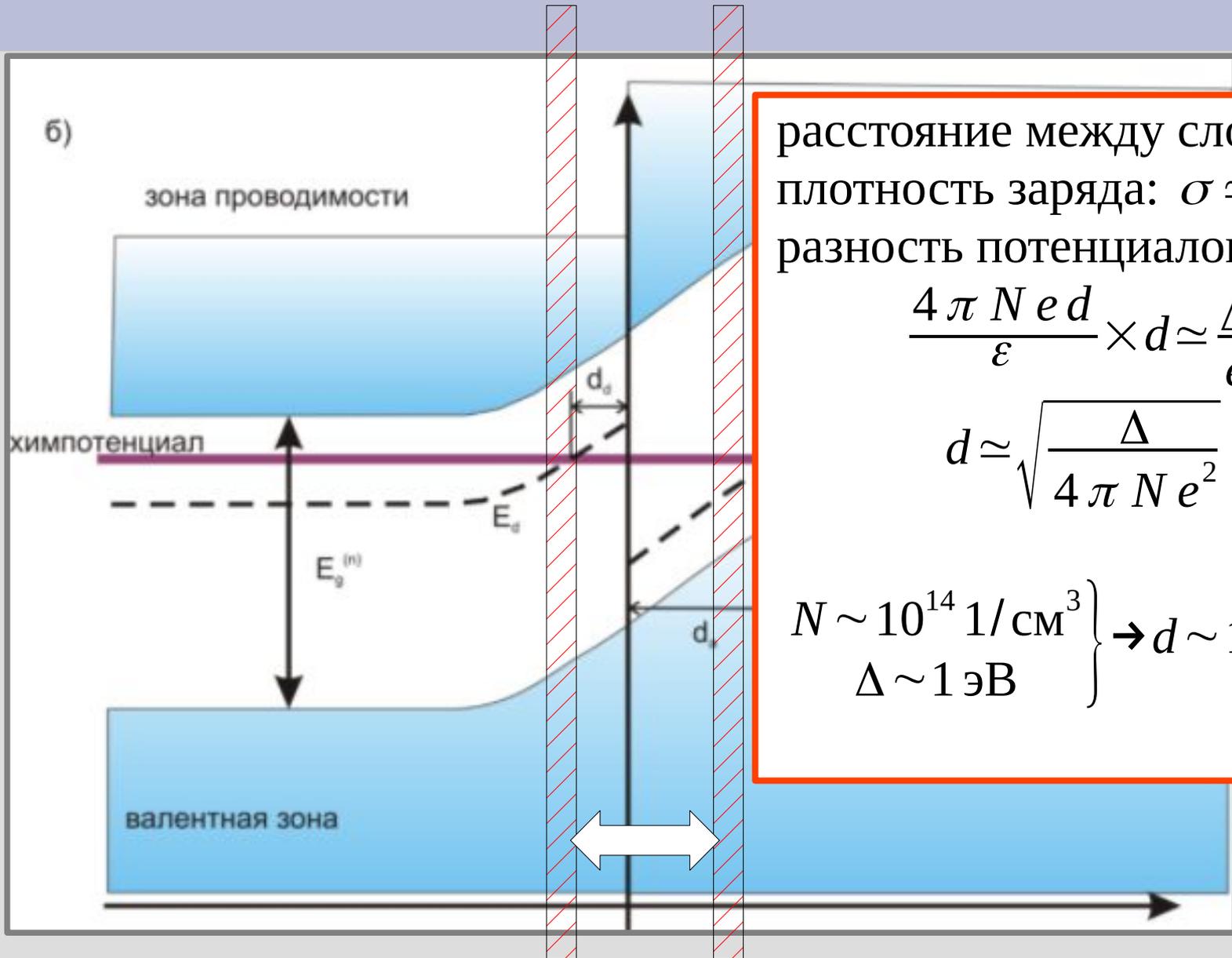
$$\varepsilon \frac{d^2 \varphi}{dx^2} = 4\pi e N_a$$

$$\mu(x) = e\varphi(x) - e\psi(x)$$

«Конденсаторное приближение»



«Конденсаторное приближение»



расстояние между слоями: d
плотность заряда: $\sigma \simeq N e d$
разность потенциалов:

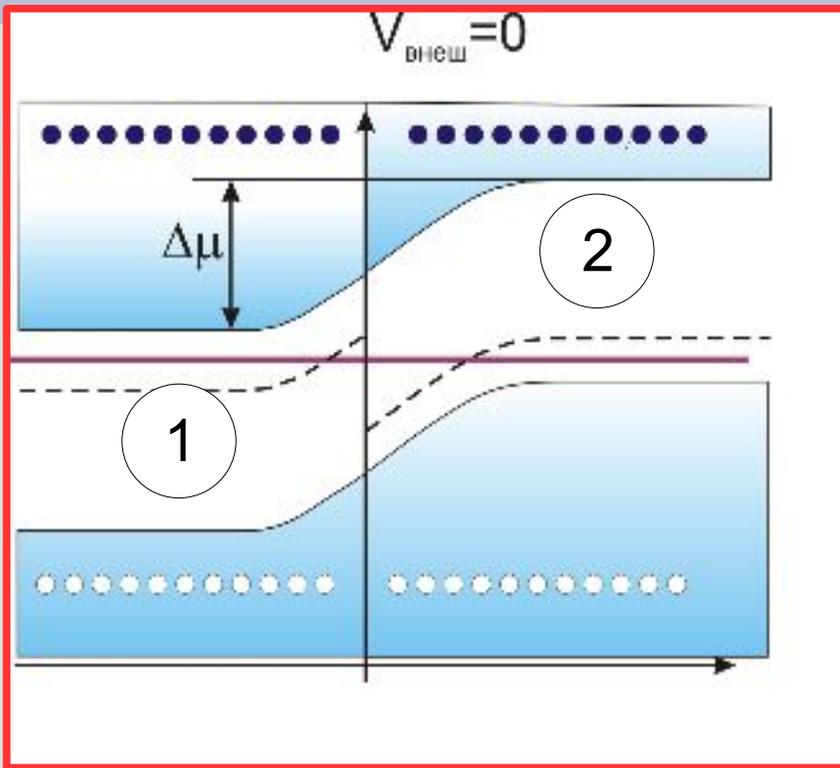
$$\frac{4 \pi N e d}{\varepsilon} \times d \simeq \frac{\Delta}{e}$$

$$d \simeq \sqrt{\frac{\Delta}{4 \pi N e^2}}$$

$$\left. \begin{array}{l} N \sim 10^{14} \text{ 1/см}^3 \\ \Delta \sim 1 \text{ эВ} \end{array} \right\} \rightarrow d \sim 10^{-4} \text{ см}$$

Часть 2. Энергетические диаграммы p-n перехода под напряжением

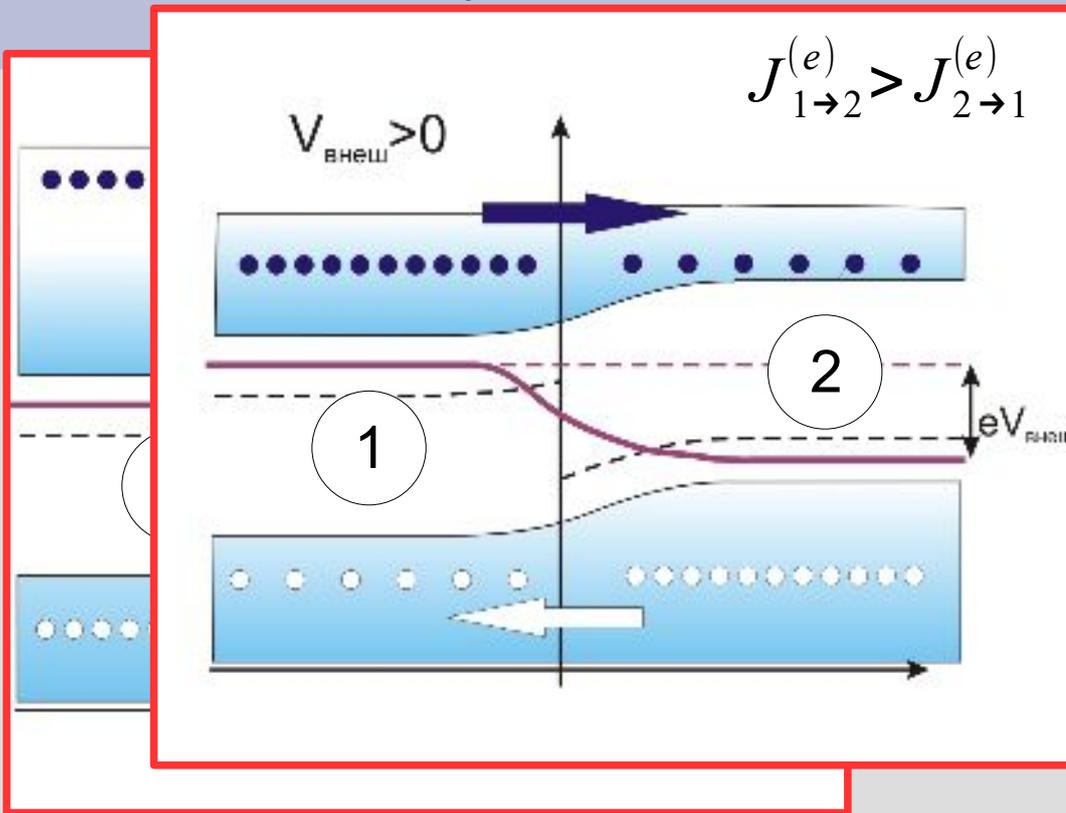
Энергетическая диаграмма р-п перехода с приложенным напряжением



$$\frac{d J_{1 \rightarrow 2}^{(e)}}{d \varepsilon} \propto D N_1 n_1 N_2 (1 - n_2) =$$

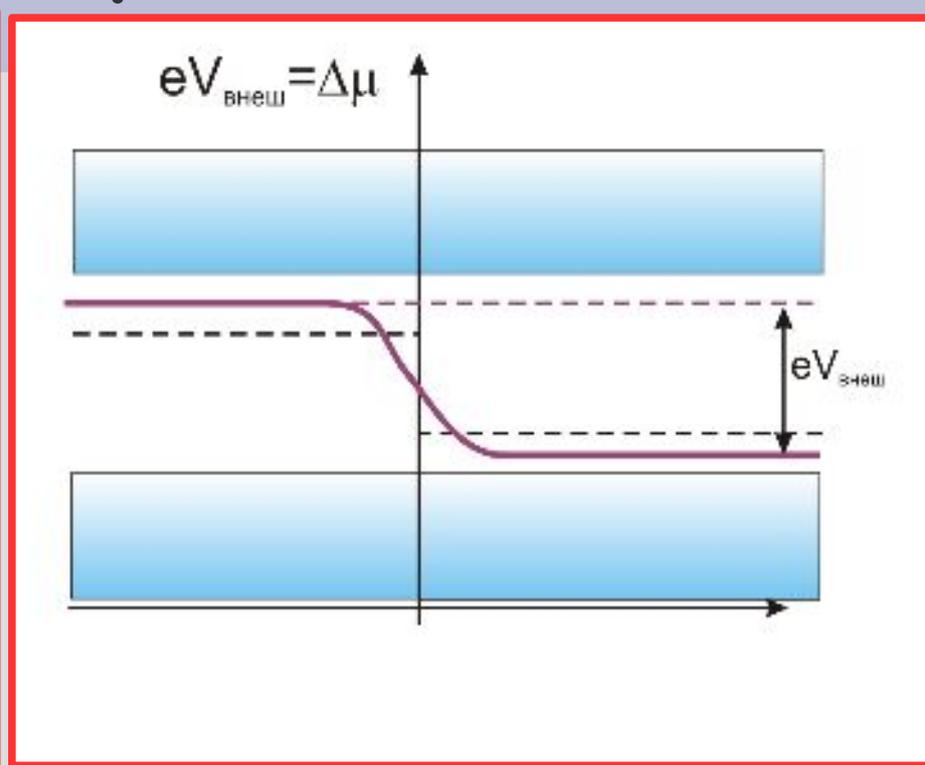
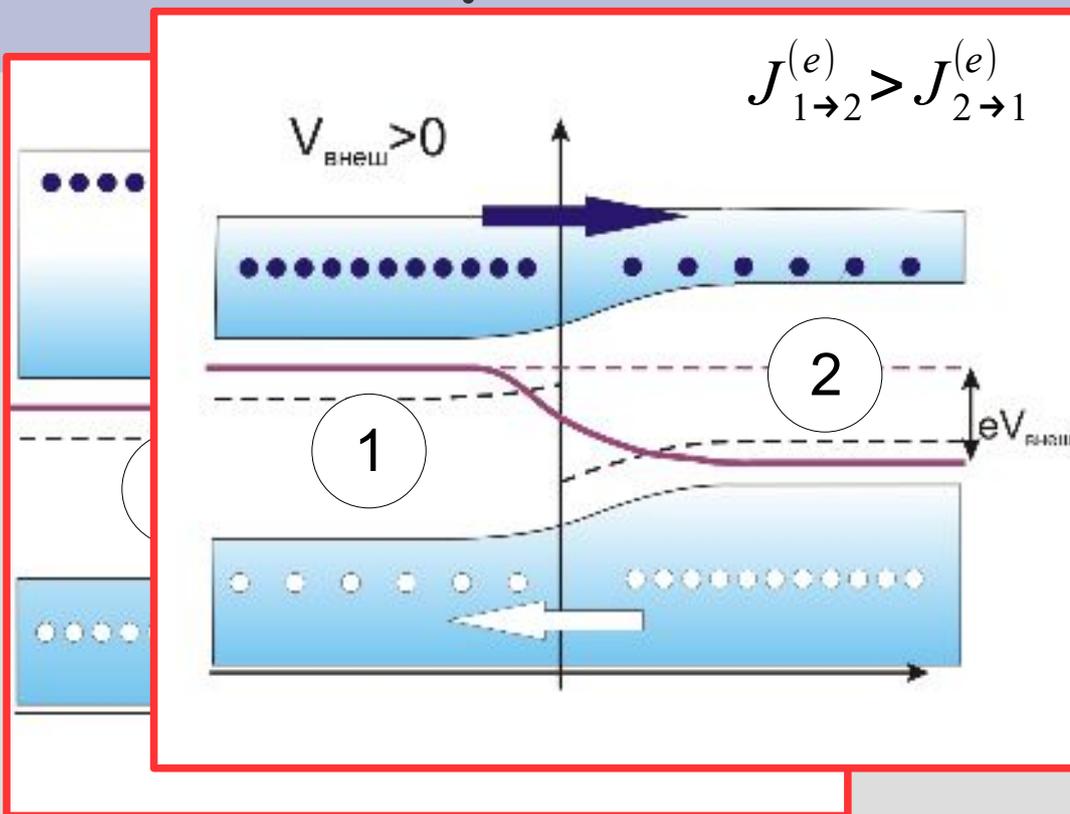
$$= D N_1 N_2 \times \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu_1)/T} + 1} \times \frac{1}{e^{-(\varepsilon - \mu_2)/T} + 1}$$

Энергетическая диаграмма р-п перехода с приложенным напряжением



$$\begin{aligned}
 \frac{d J_{1 \rightarrow 2}^{(e)}}{d \varepsilon} &\propto D N_1 n_1 N_2 (1 - n_2) = \\
 &= D N_1 N_2 \times \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu_1)/T} + 1} \times \frac{1}{e^{-(\varepsilon - \mu_2)/T} + 1}
 \end{aligned}$$

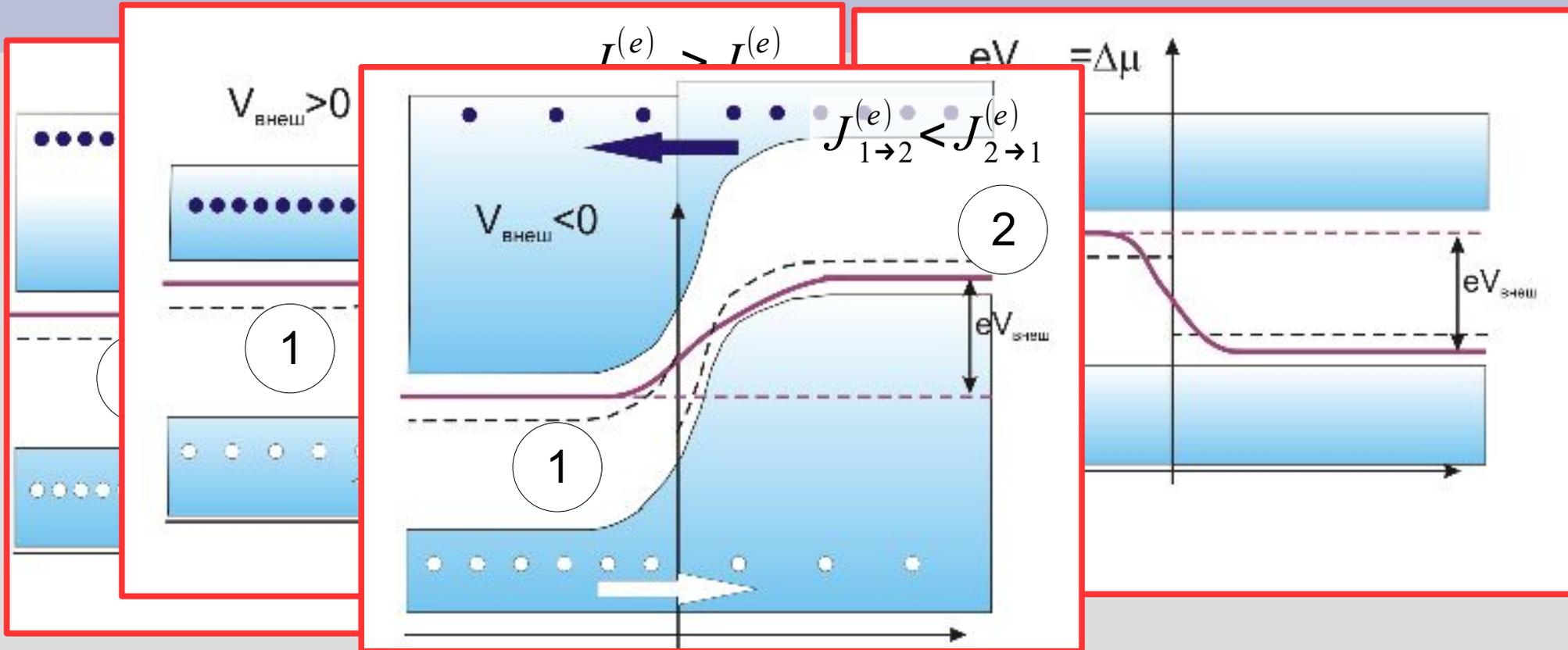
Энергетическая диаграмма р-n перехода с приложенным напряжением



$$\frac{d J_{1 \rightarrow 2}^{(e)}}{d \varepsilon} \propto D N_1 n_1 N_2 (1 - n_2) =$$

$$= D N_1 N_2 \times \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu_1)/T} + 1} \times \frac{1}{e^{-(\varepsilon - \mu_2)/T} + 1}$$

Энергетическая диаграмма р-n перехода с приложенным напряжением



$$\frac{d J_{1 \rightarrow 2}^{(e)}}{d \varepsilon} \propto D N_1 n_1 N_2 (1 - n_2) =$$

$$= D N_1 N_2 \times \frac{1}{e^{(\varepsilon - \mu_1)/T} + 1} \times \frac{1}{e^{-(\varepsilon - \mu_2)/T} + 1}$$

Часть 3. Туннельный диод Лео Есаки



The Nobel Prize in Physics 1973

Leo Esaki, Ivar Giaever, Brian D. Josephson

Share this:     

Leo Esaki - Facts



Leo Esaki

Born: 12 March 1925, Osaka, Japan

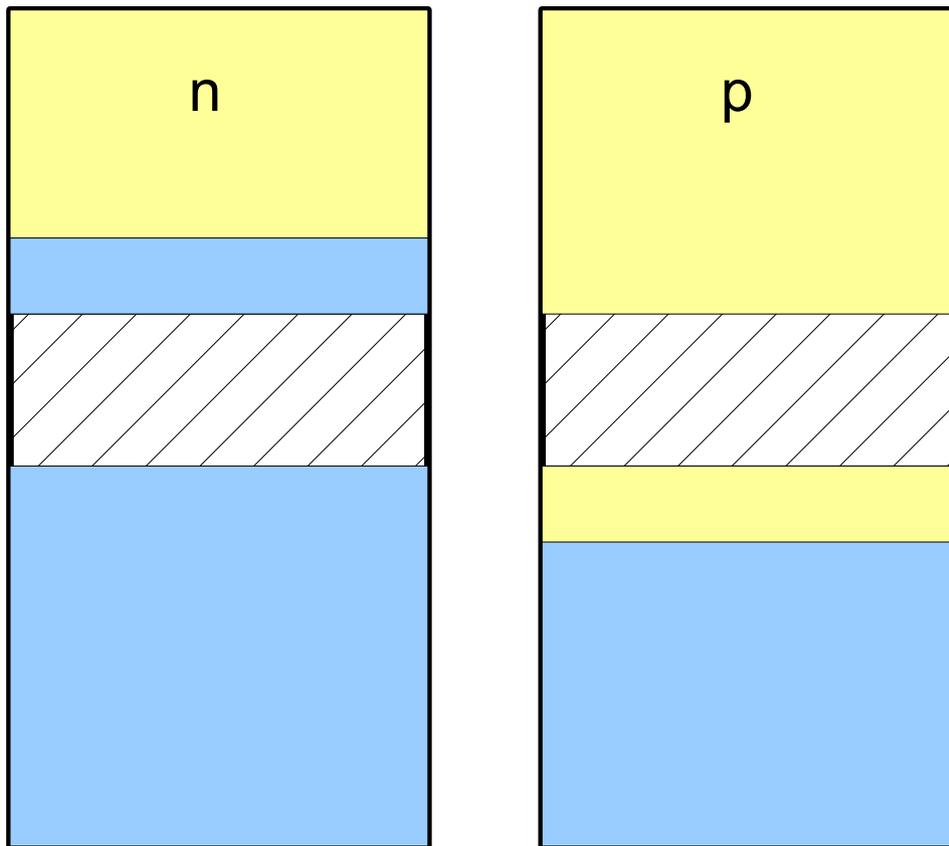
Affiliation at the time of the award: IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY, USA

Prize motivation: "for their experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductors and superconductors, respectively"

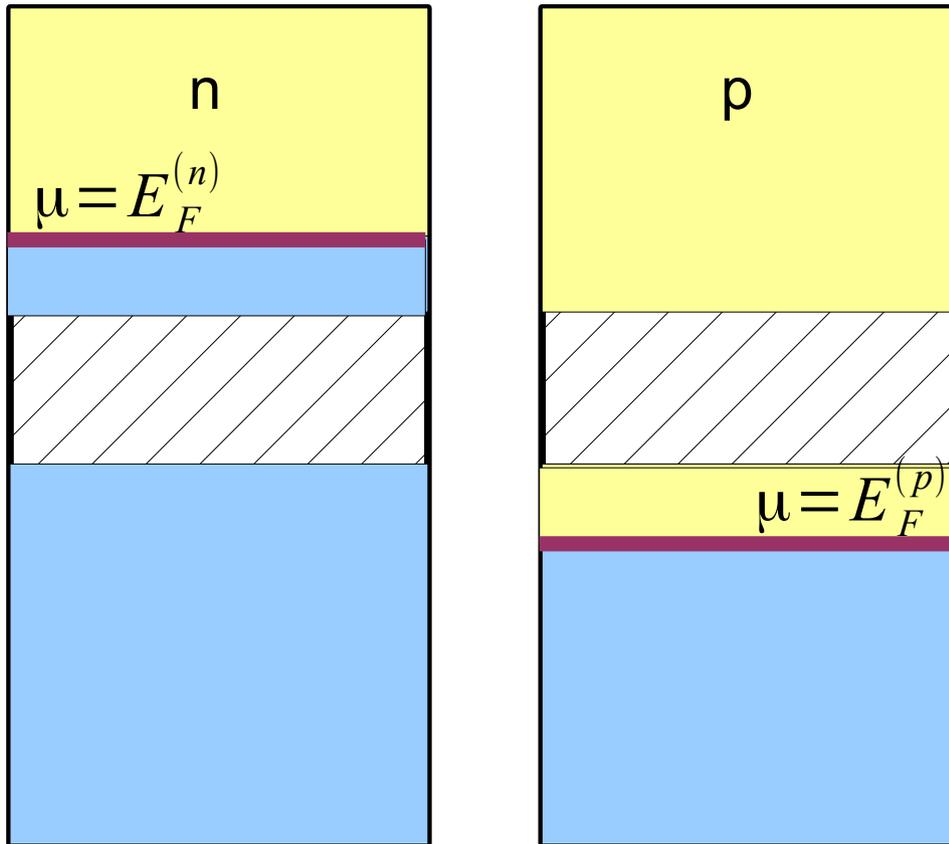
Field: condensed matter physics, semiconductors

Prize share: 1/4

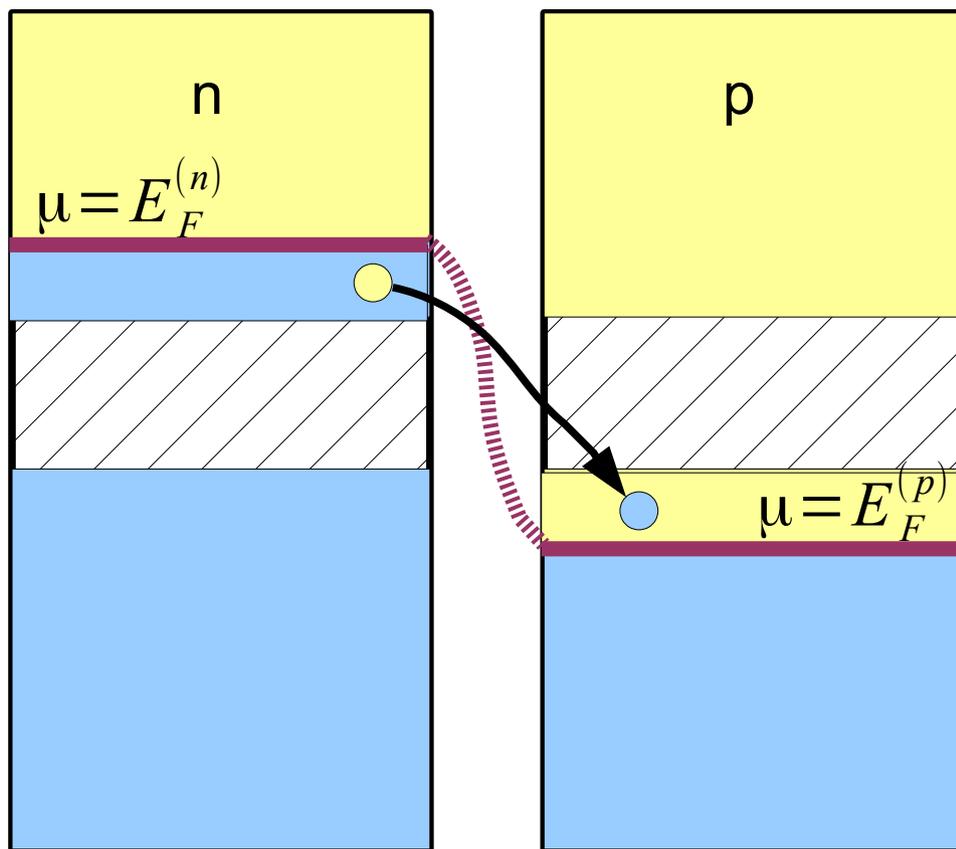
Контакт сильно легированных полупроводников



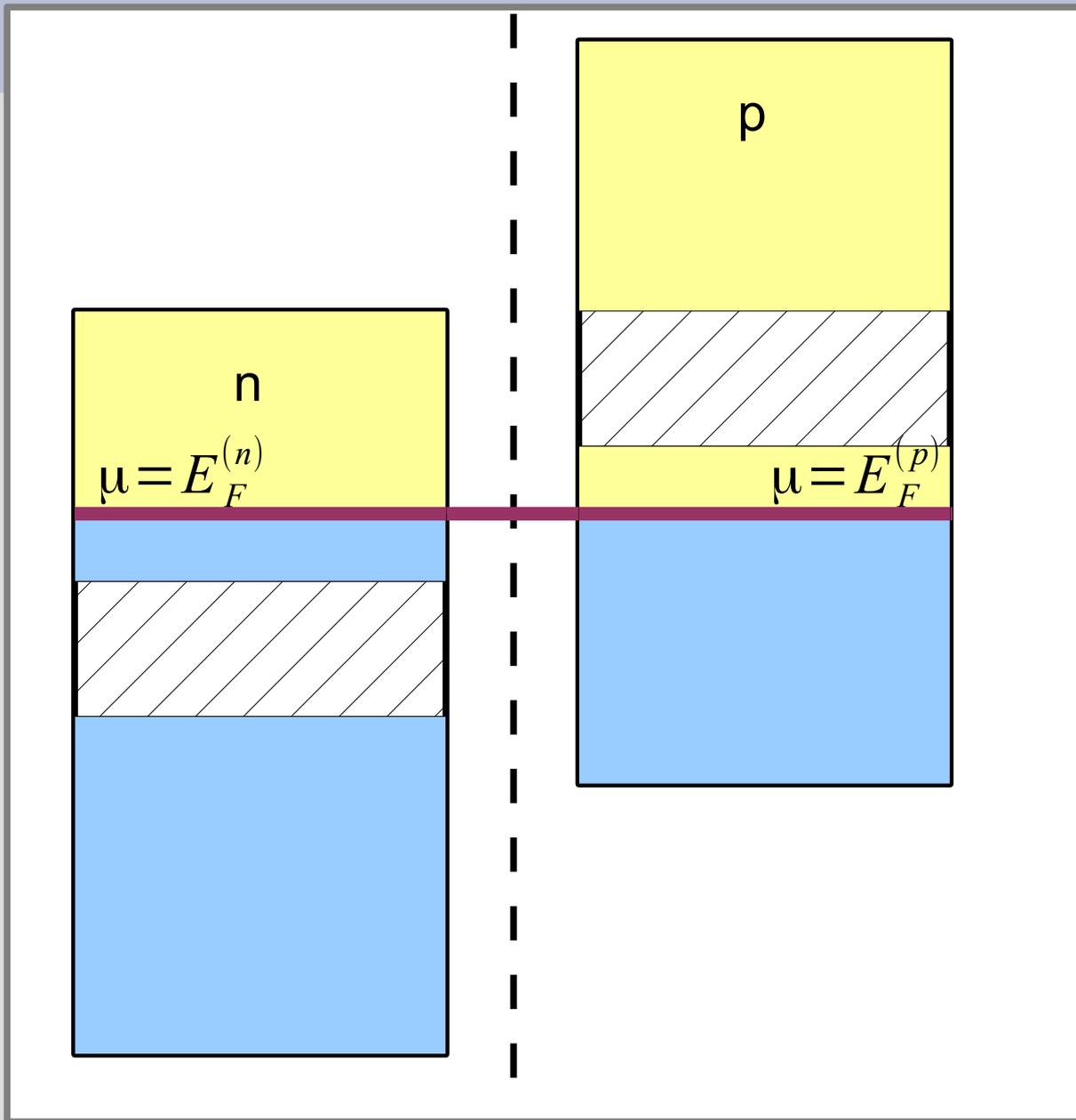
Контакт сильно легированных полупроводников



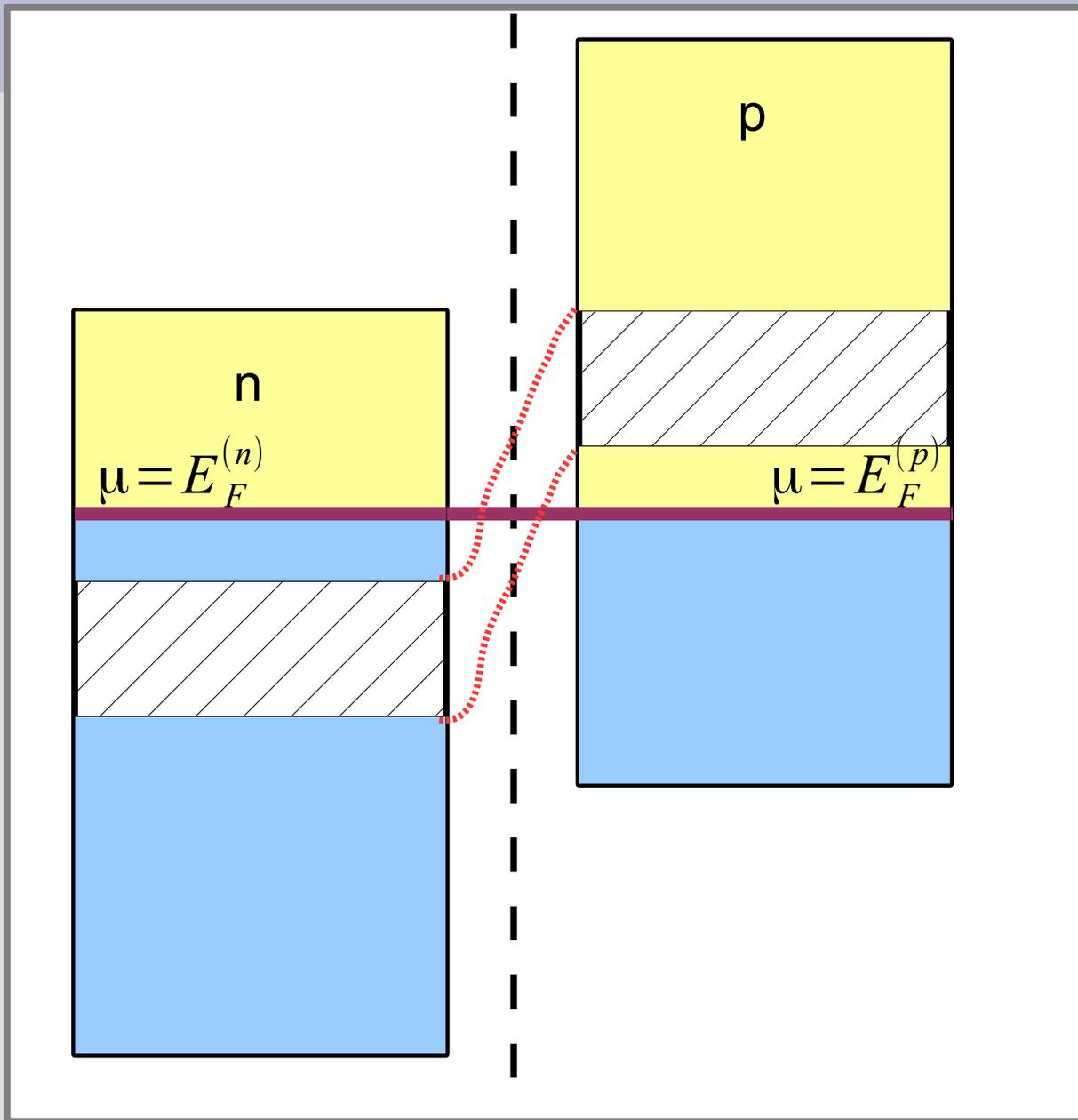
Контакт сильно легированных полупроводников



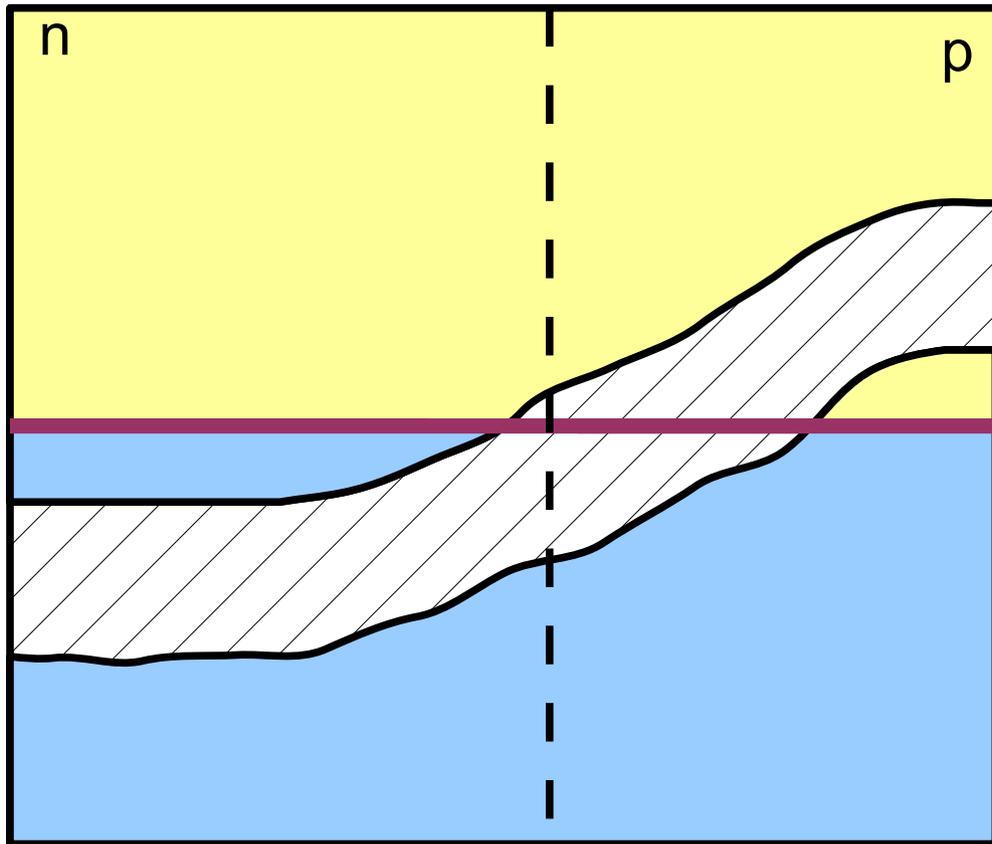
Энергетические диаграммы



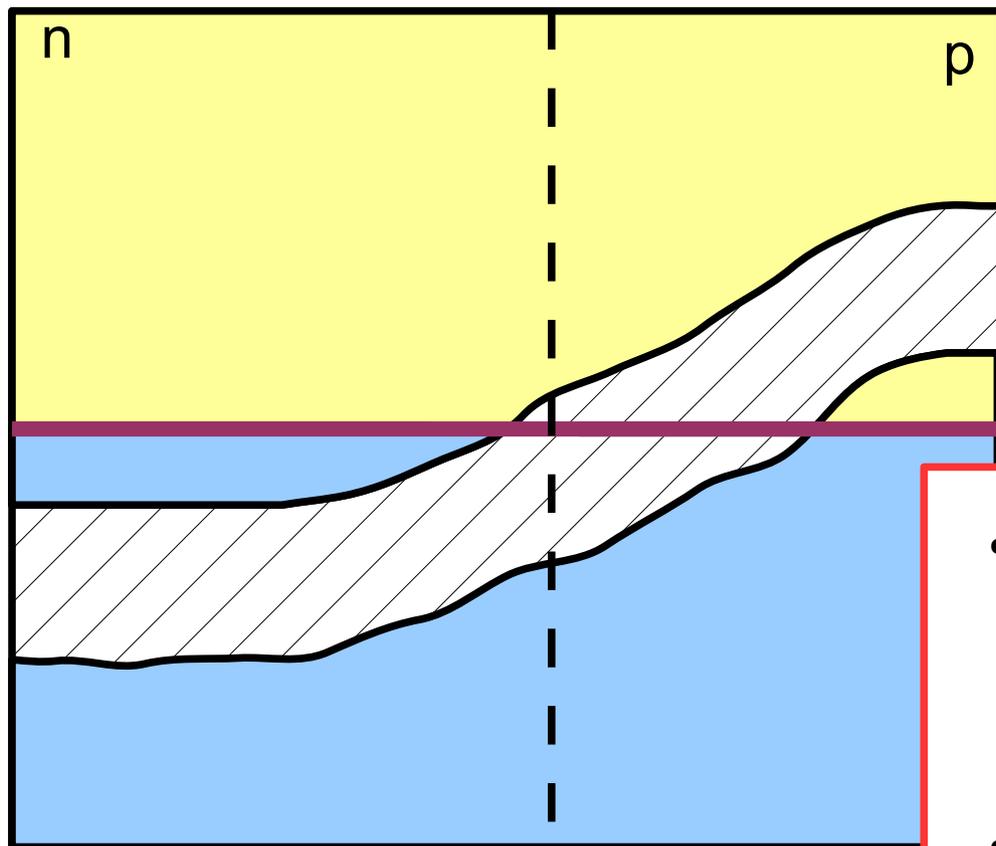
Энергетические диаграммы



Энергетические диаграммы

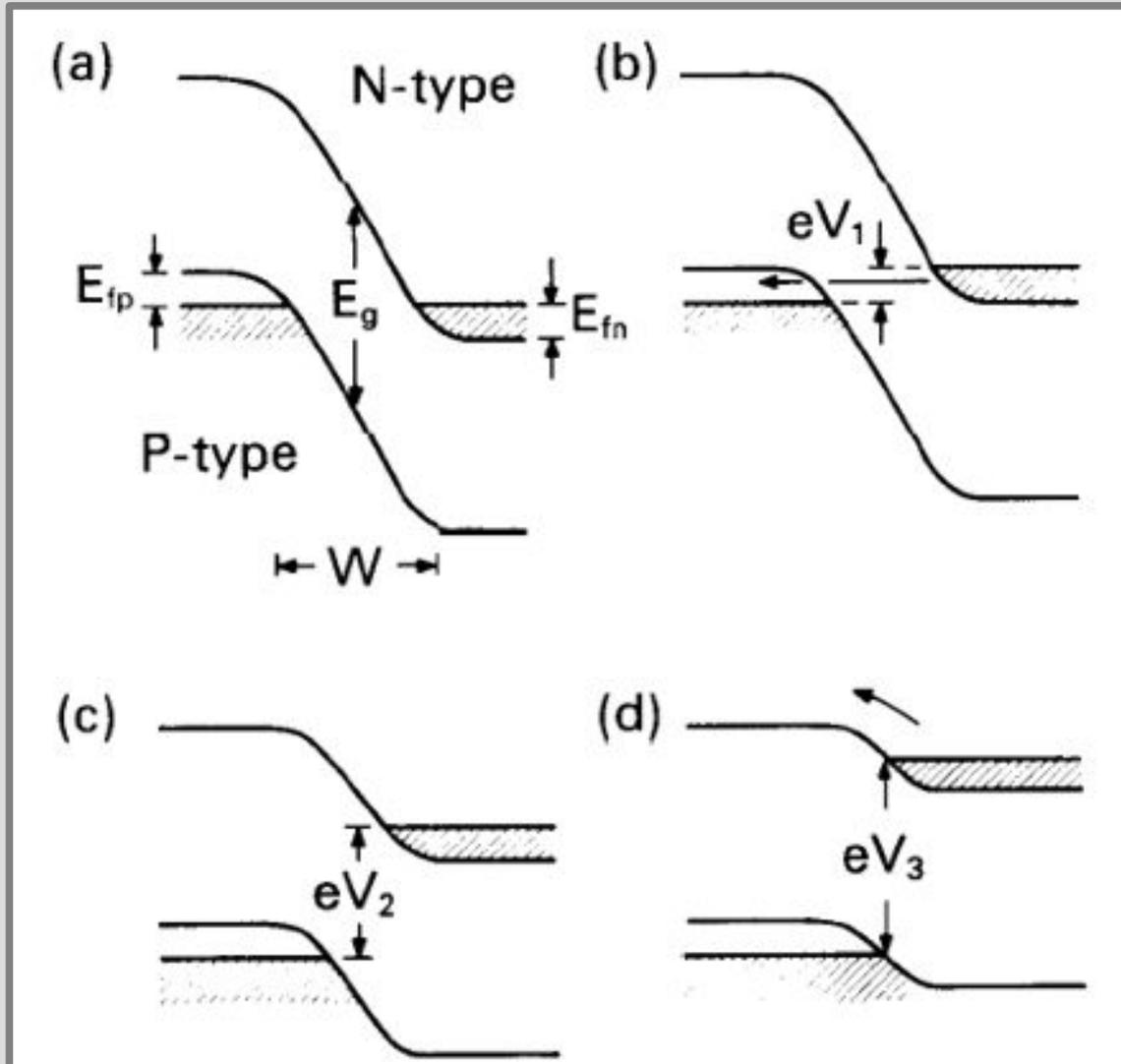


Энергетические диаграммы

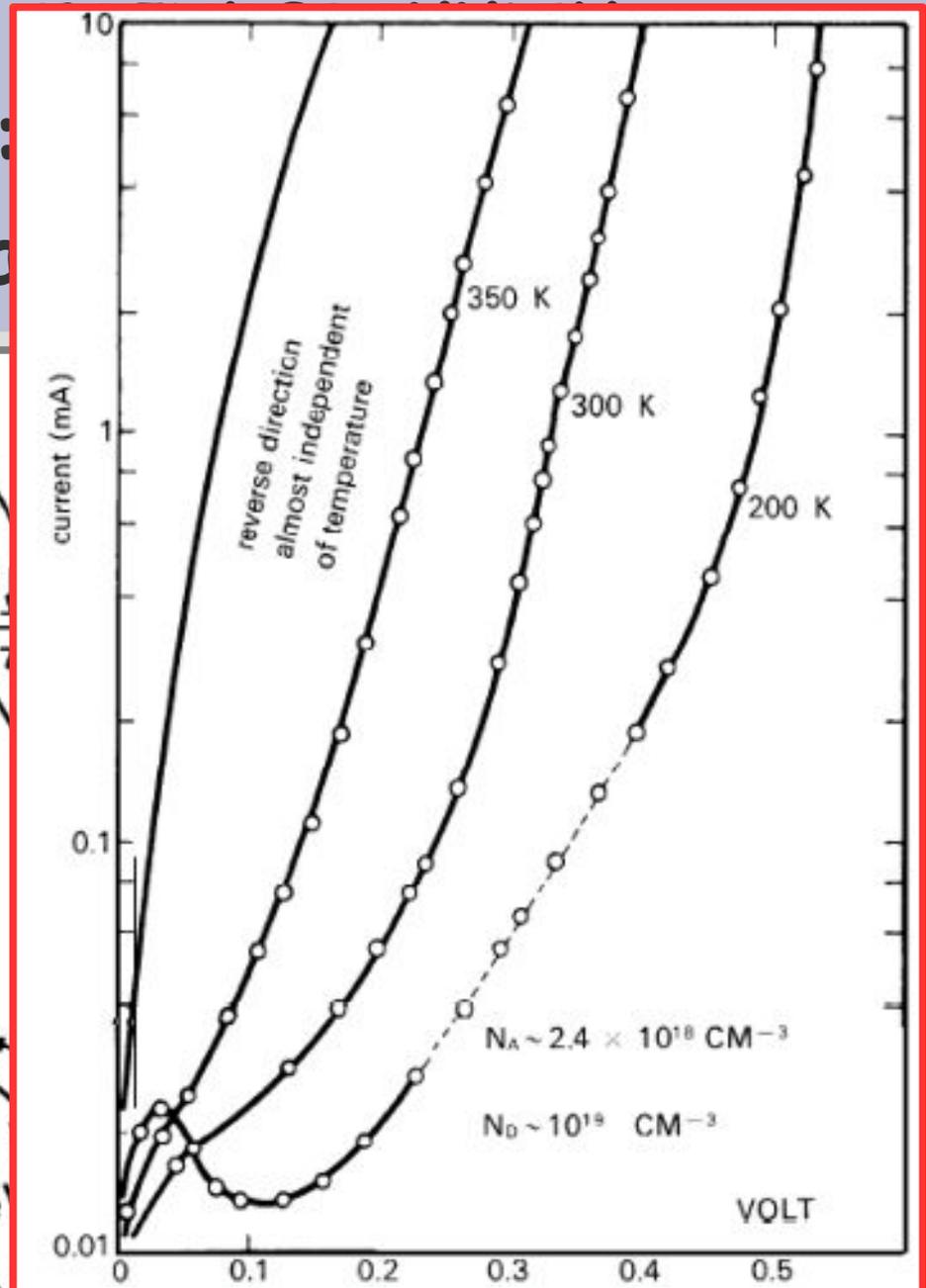
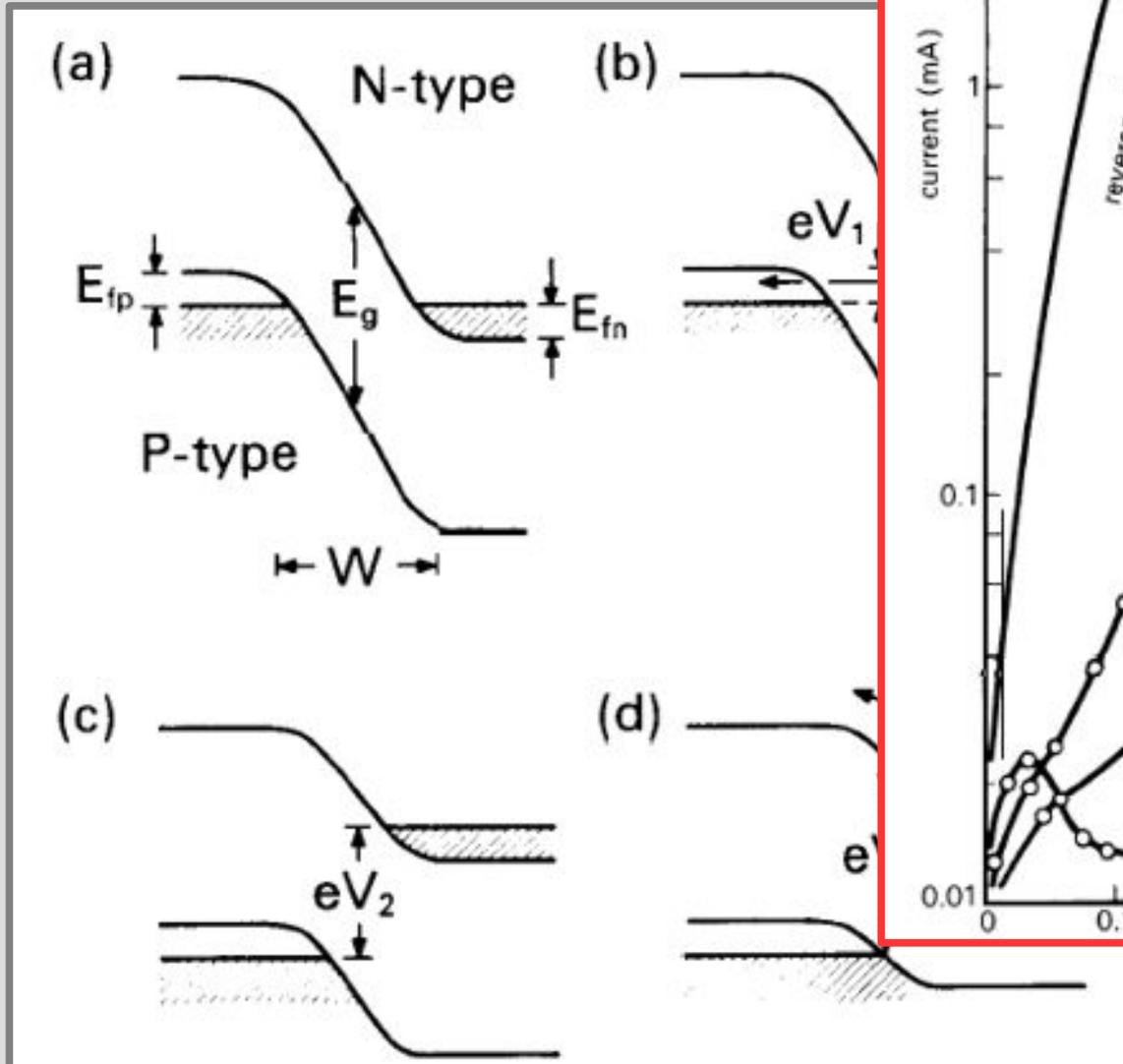


- при $T=0$ оба сильно легированных полупроводника - «металлы»
- ток через контакт — только туннельный!

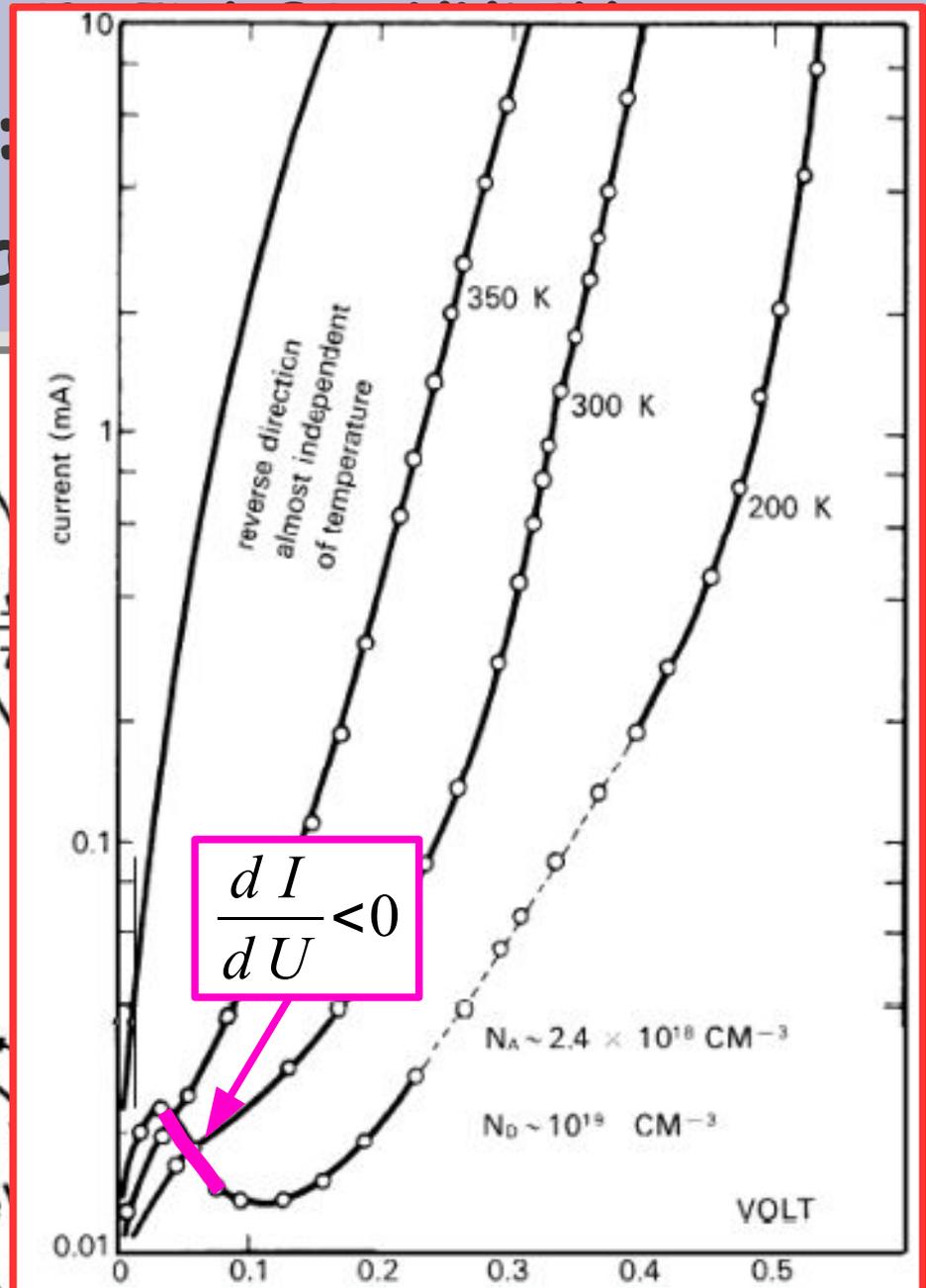
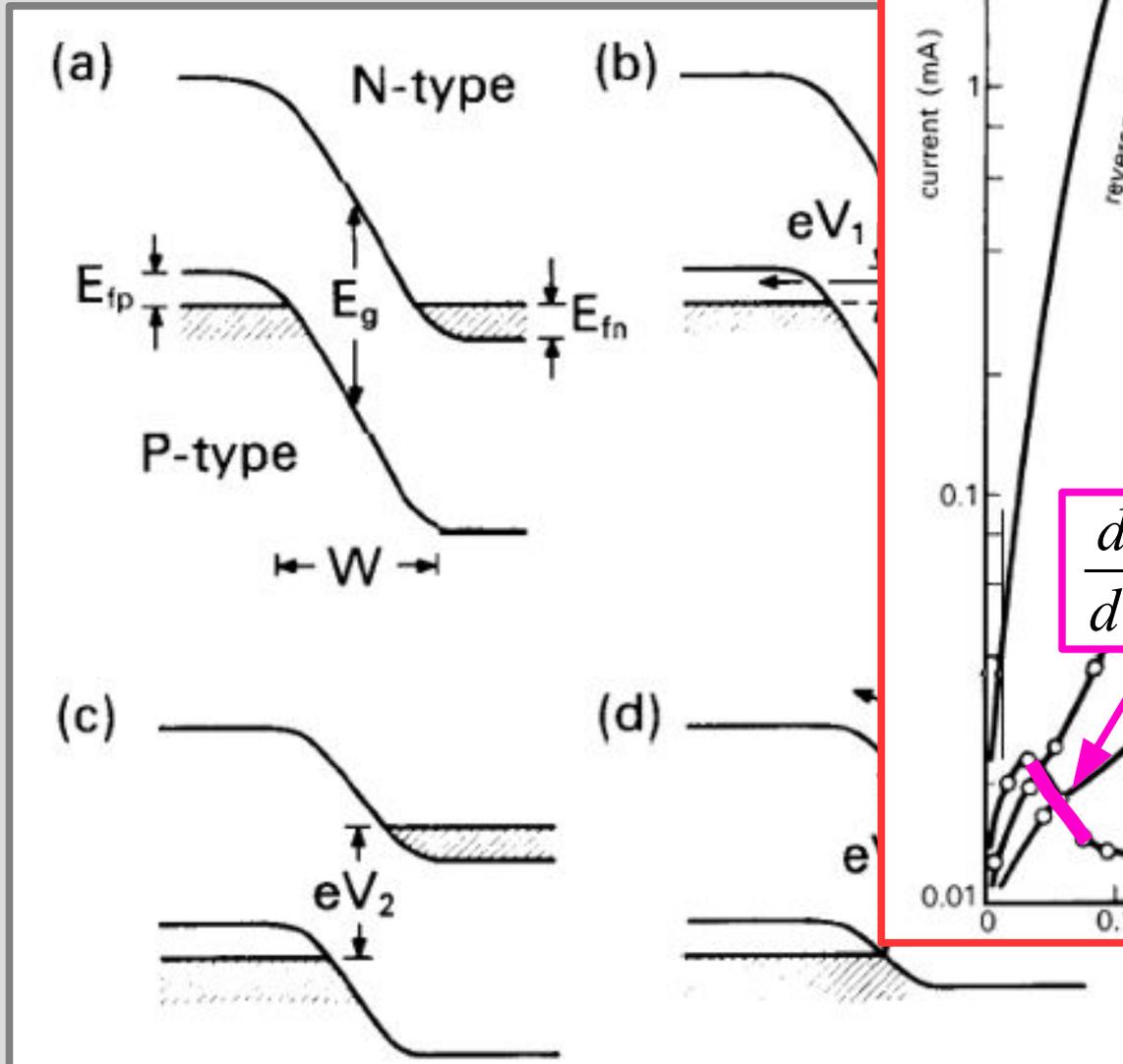
Энергетические диаграммы туннельного диода под напряжением



Контакт сильно полупроводников: диагра



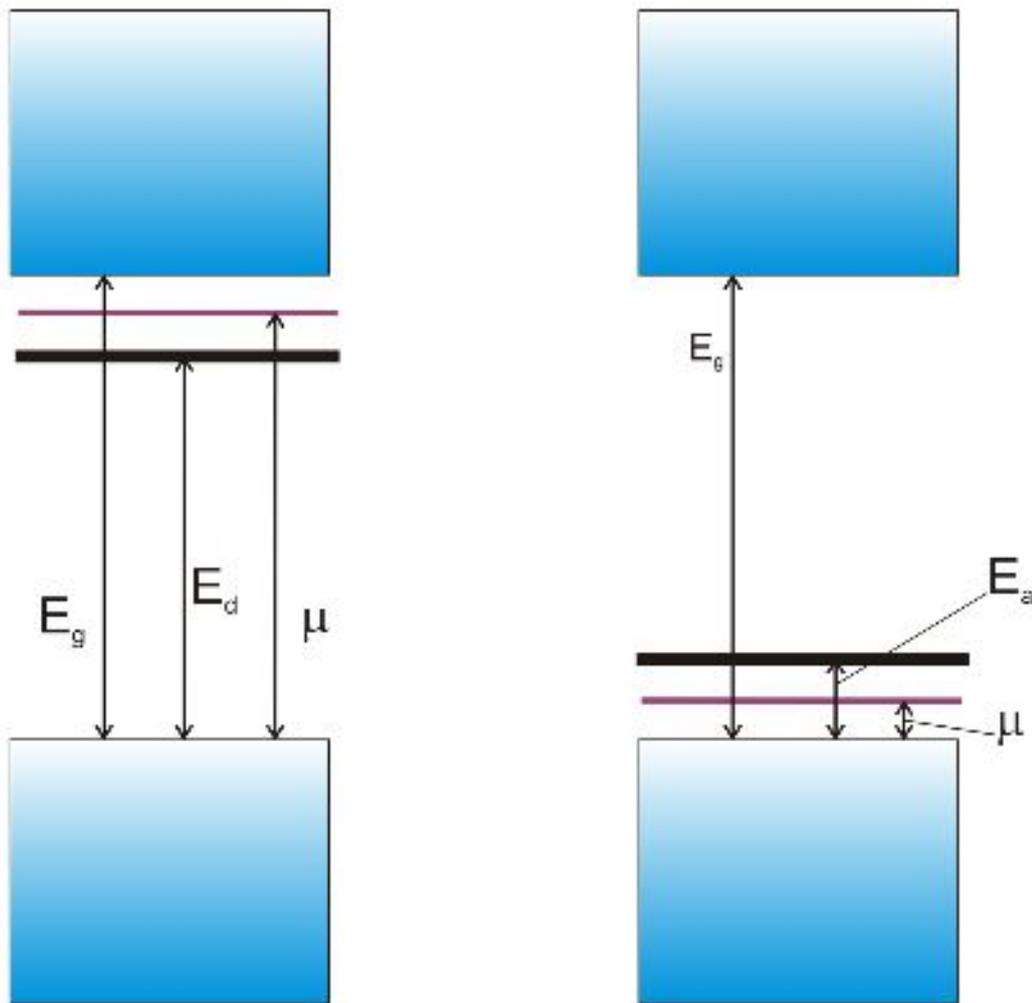
Контакт сильно полупроводников: диагра



Часть 4. Гетероструктуры

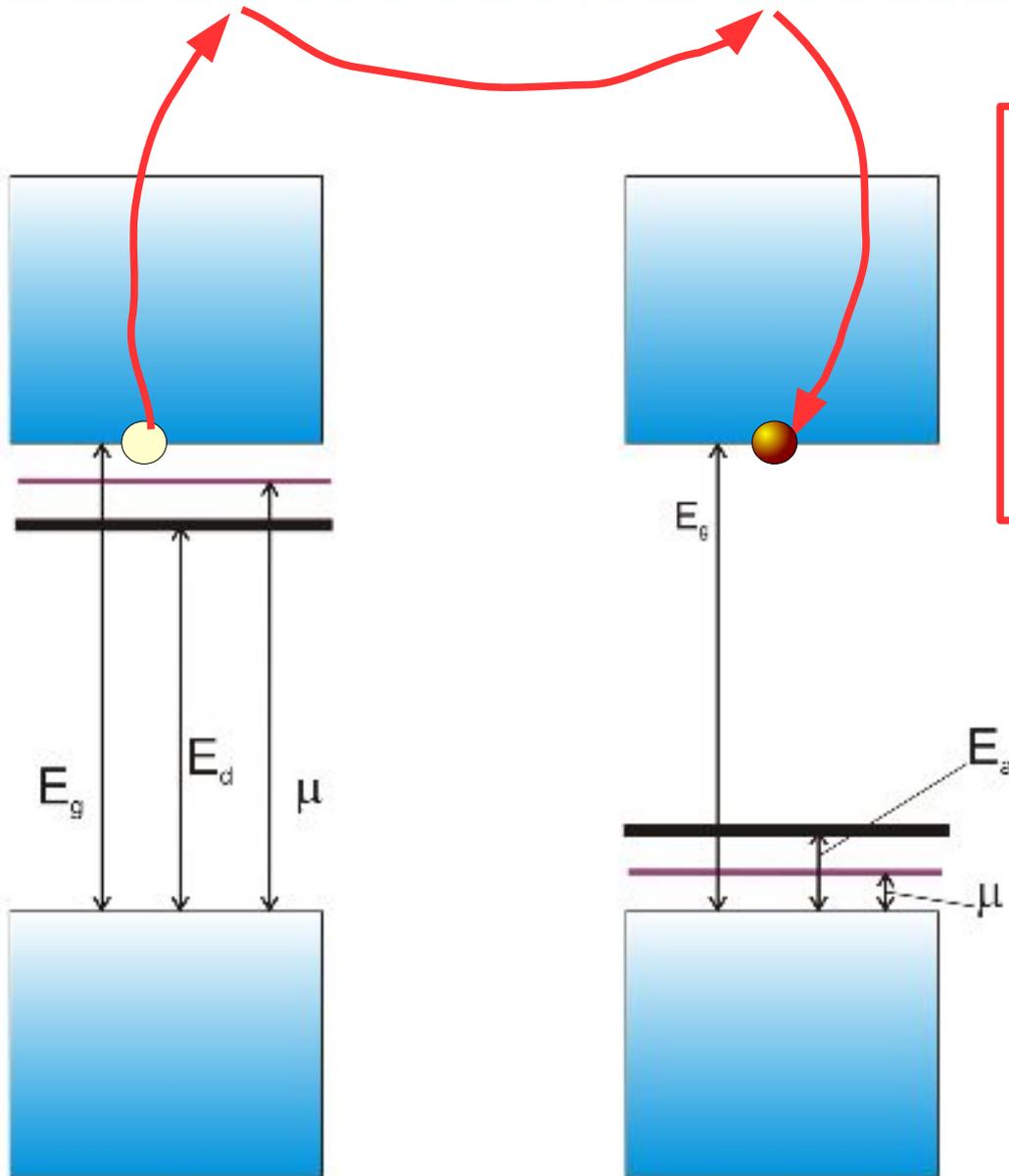
Правило Андерсона

уровень минимальной энергии электрона в вакууме



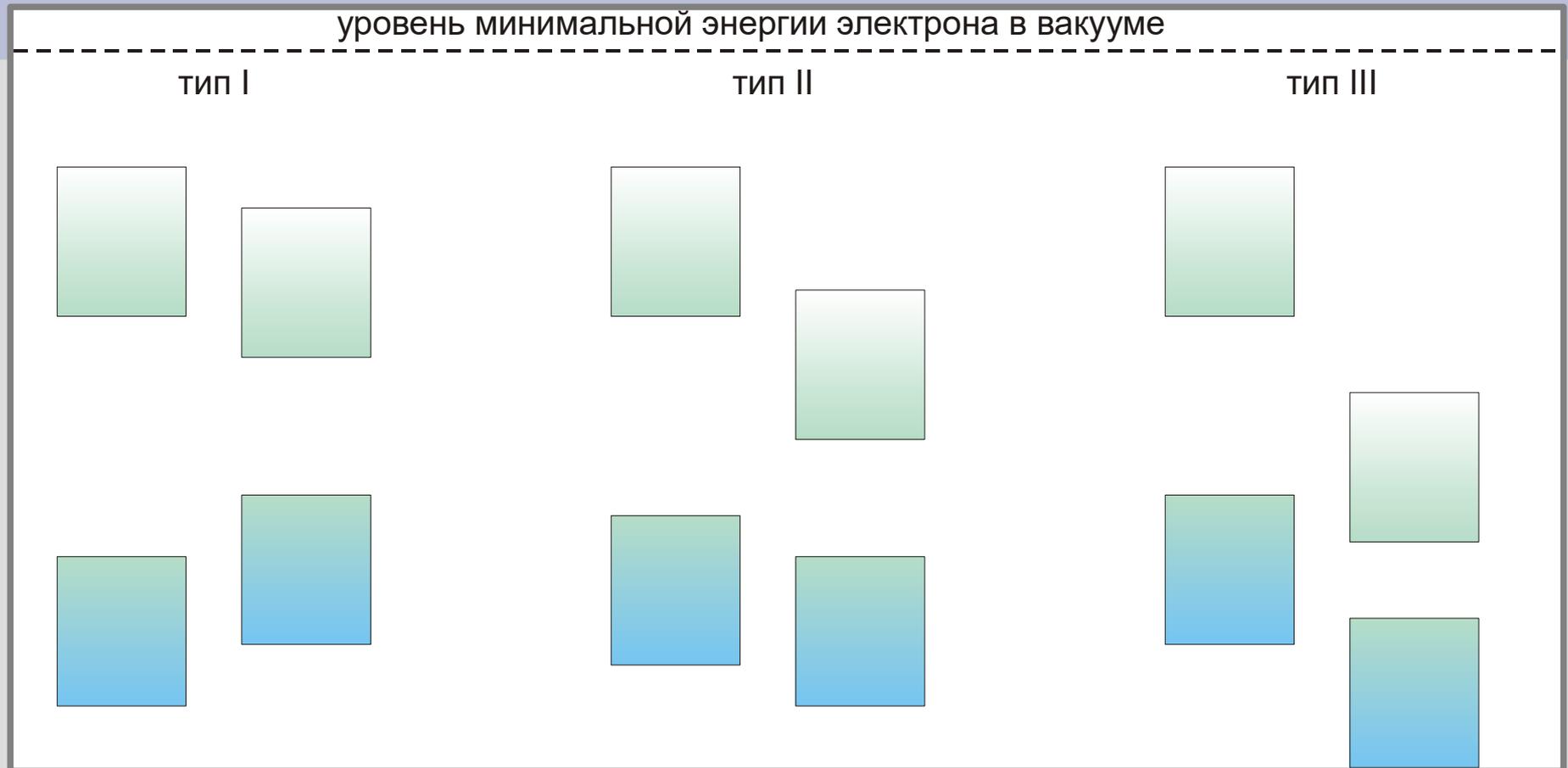
Правило Андерсона

уровень минимальной энергии электрона в вакууме



Отложить от уровня минимальной энергии электрона в вакууме сродство к электрону. Это определит положение дна зоны проводимости.

Гетеропереход. Типы гетероперехода.



Гетеропереход. Типы гетероперехода.



случай
GaAs-AlAs

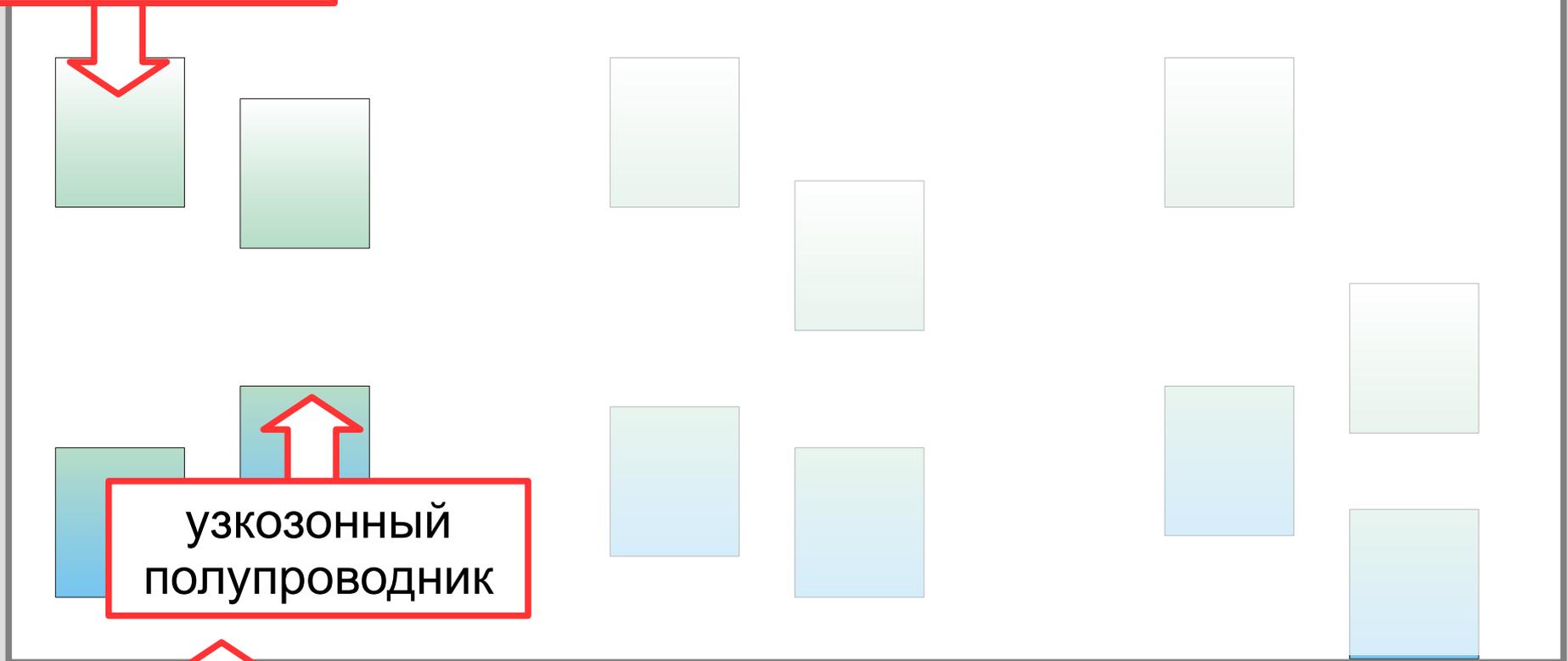
Гетеропереход. Типы гетероперехода.

широкозонный
полупроводник

уровень минимальной энергии электрона в вакууме

тип II

тип III



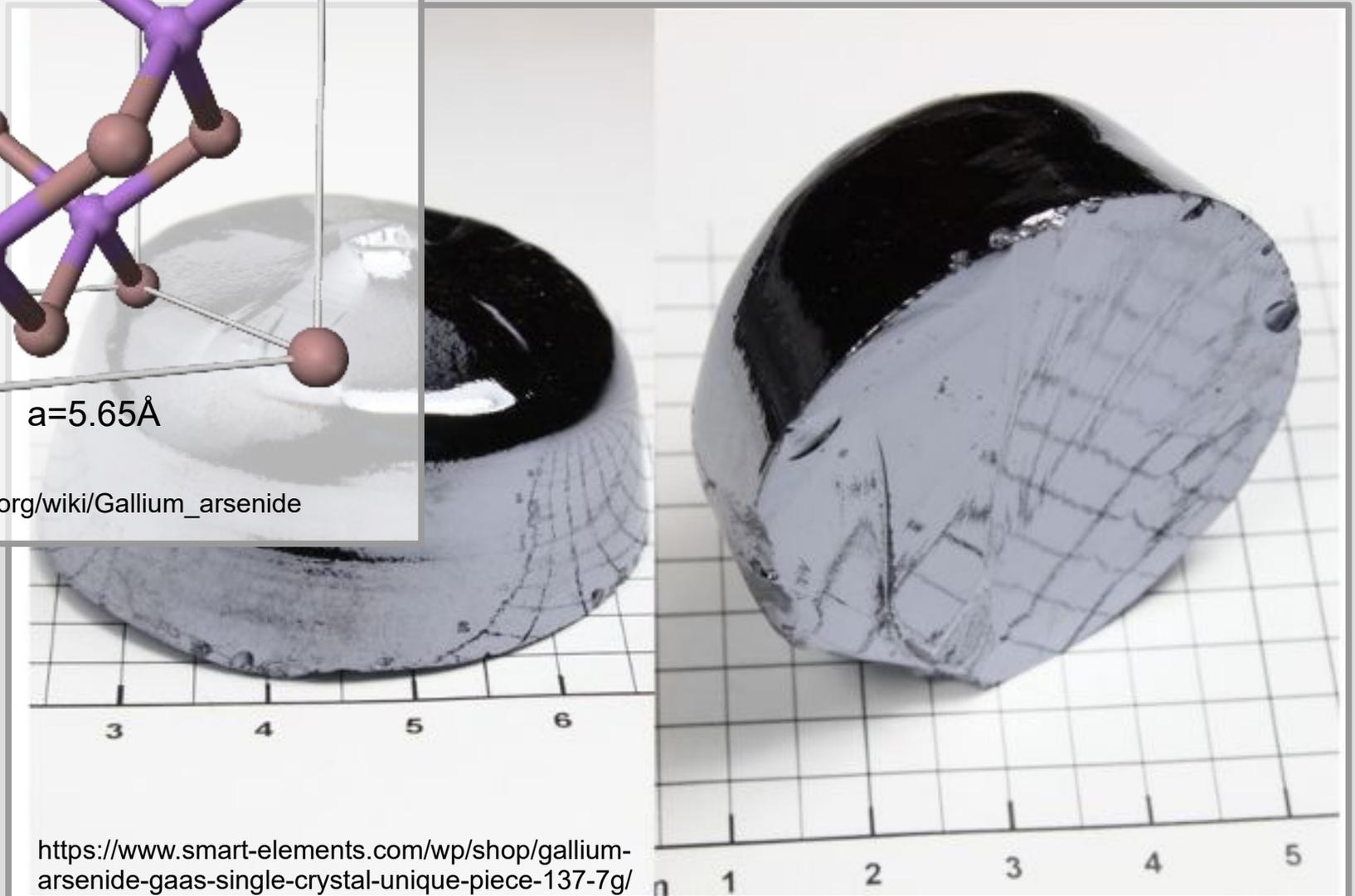
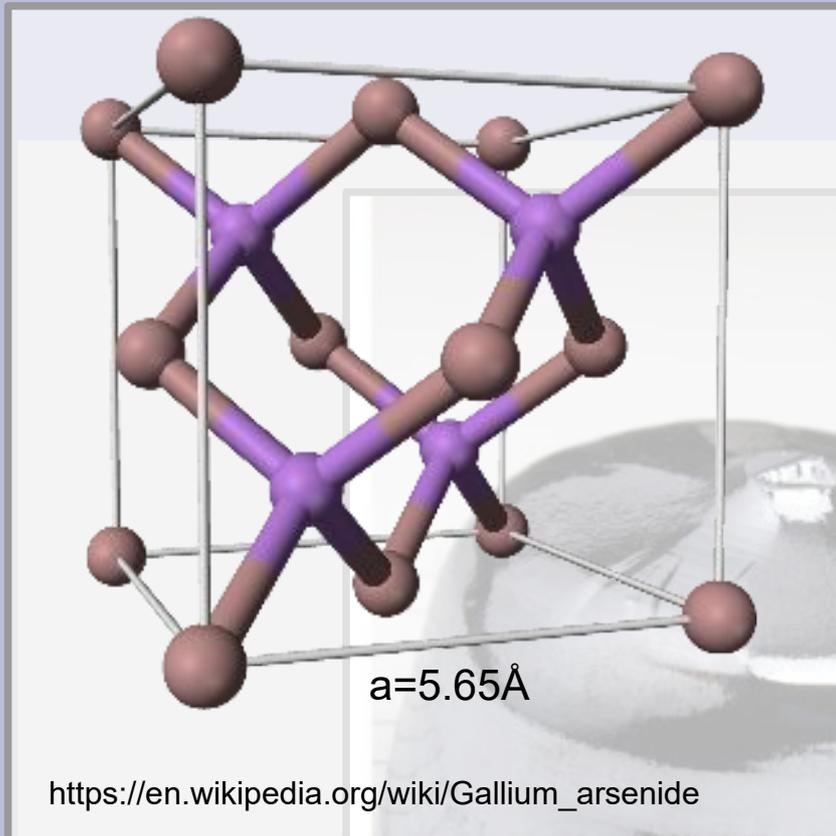
узкозонный
полупроводник

случай
GaAs-AlAs

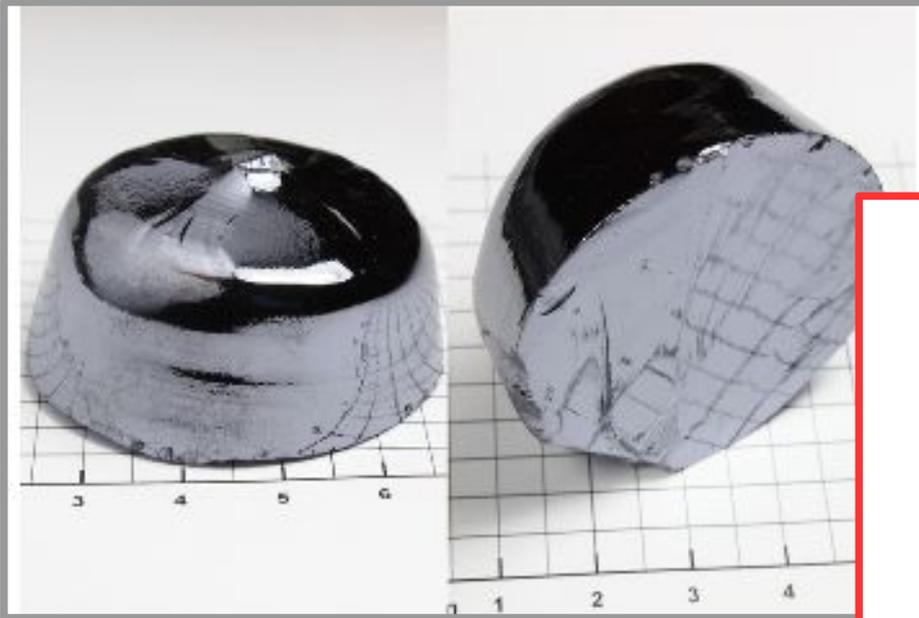
Технология: требования к материалам для гетероперехода.

- разные ширина запрещённой зоны и средство полупроводника
- возможность получения атомно-гладкой границы (в т.ч.: близкие периоды решётки!)
- технологичность (чистота, стабильность, возможность легирования)

Структура GaAs



Ga-Al-As



	AlAs	GaAs
период решётки, Å	5.6611	5.6533
ширина зоны, эВ	2.16	1.42
средство, эВ	3.5	4.1
тип проводимости	(I) «n»	(D) «p»

Ga-Al-As



III		IV		V	
B 5 10,811 Бор	C 6 12,01115 Углерод	N 7 14,0067 Азот			
Al 13 26,9815 Алюминий	Si 14 28,086 Кремний	P 15 30,9738 Фосфор			
21 44,956 Sc Скандий	22 47,90 Ti Титан	23 50,942 V Ванадий			
Ga 31 69,72 Галлий	Ge 32 72,59 Германий	As 33 74,9216 Мышьяк			



	AlAs	GaAs
период решётки, Å	5.6611	5.6533
ширина зоны, эВ	2.16	1.42
средство, эВ	3.5	4.1
ТИП проводимости	(I) «n»	(D) «p»

Ga-Al-As



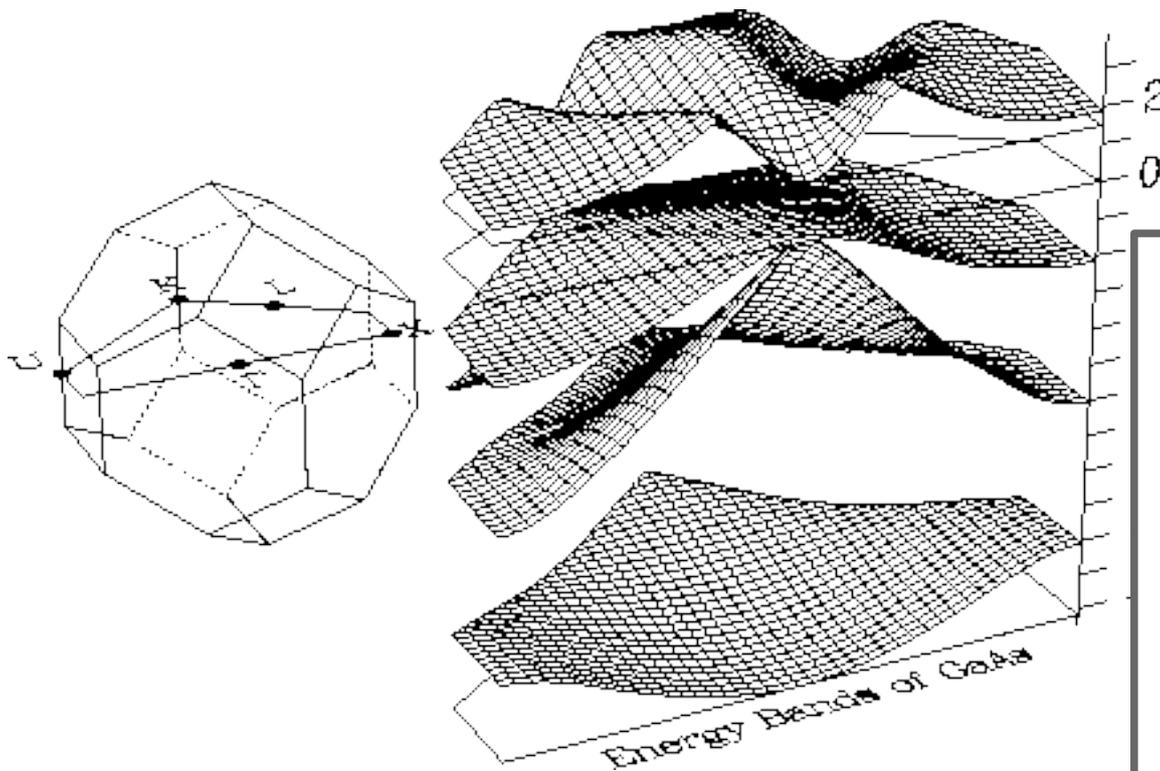
III	IV	V
	6 12,01115	N 7 14,0067 Азот
13 26,9815 Al Алюминий	14 28,086 Si Кремний	15 30,9738 P Фосфор
21 44,956 Sc Скандий	22 47,90 Ti Титан	23 50,942 V Ванадий
31 69,72 Ga Галлий	32 72,59 Ge Германий	33 74,9216 As Мышьяк

одинаковая валентность Al и Ga!



	AlAs	GaAs
период решётки, Å	5.6611	5.6533
ширина зоны, эВ	2.16	1.42
средство, эВ	3.5	4.1
тип проводимости	(I) «n»	(D) «p»

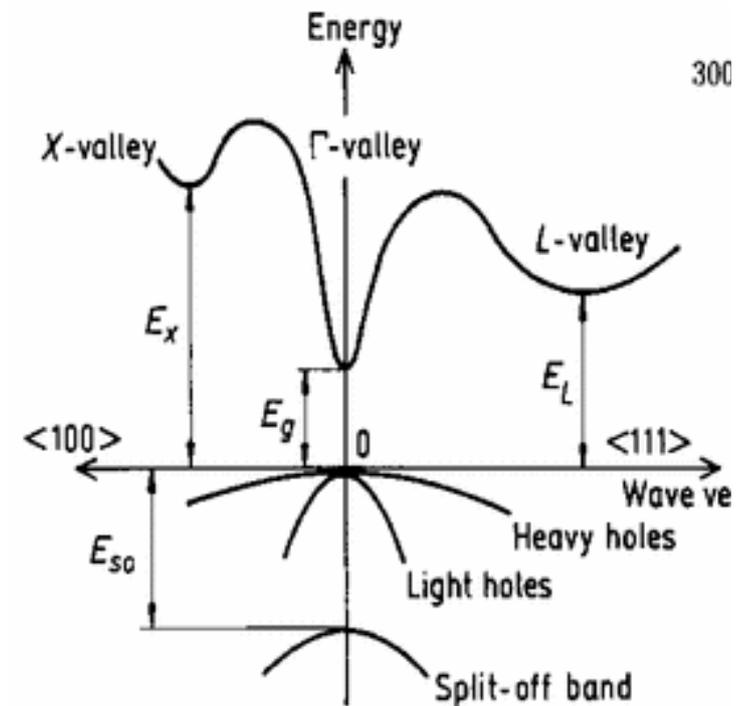
Зонная структура прямозонного полупроводника GaAs



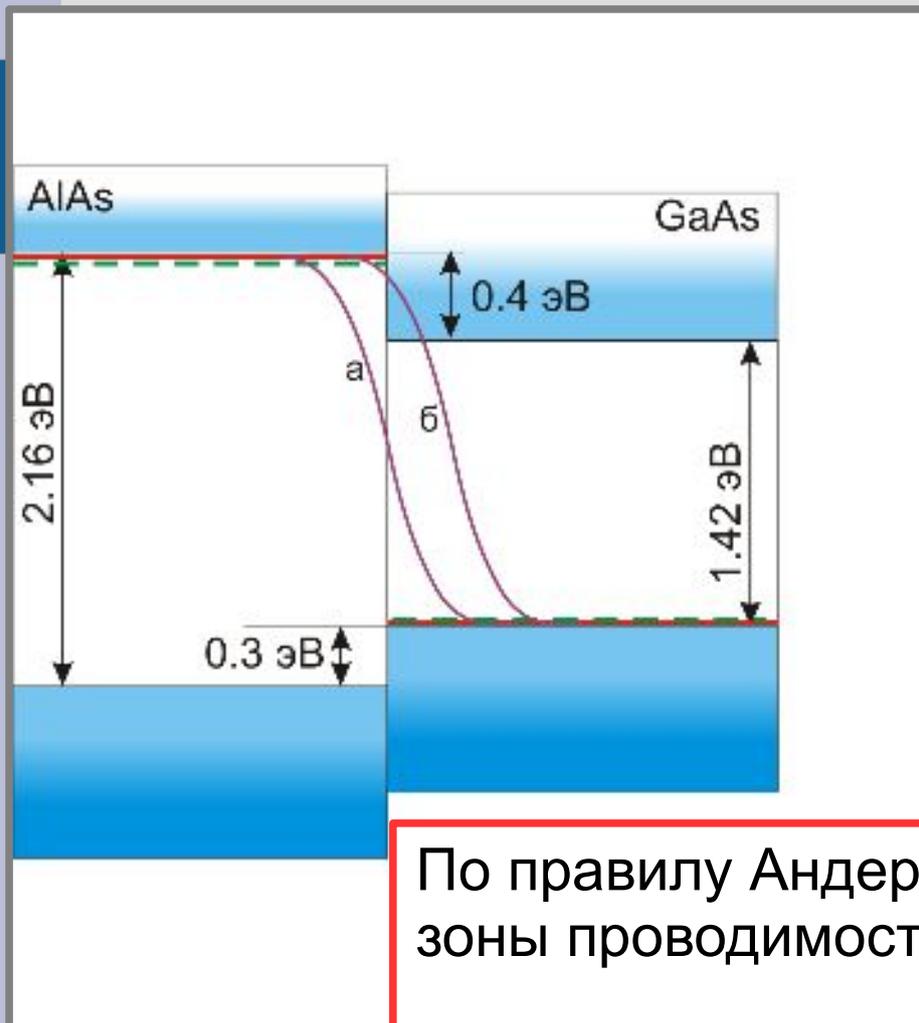
Зонная структура GaAs. Слева: первая зона Бриллюэна и рассматриваемое сечение первой зоны. Справа: вычисленная в выбранном сечении энергия, показана только нижняя из зон проводимости. Ноль отсчёта энергии соответствует потолку валентной зоны.

W. R. Frensley and N. G. Einspruch editors, Heterostructures and Quantum Devices, Academic Press, 1994

Сечение дисперсионных поверхностей арсенида галлия в направлениях [100] и [111].



Энергетическая диаграмма гетероперехода nAlAs-pGaAs

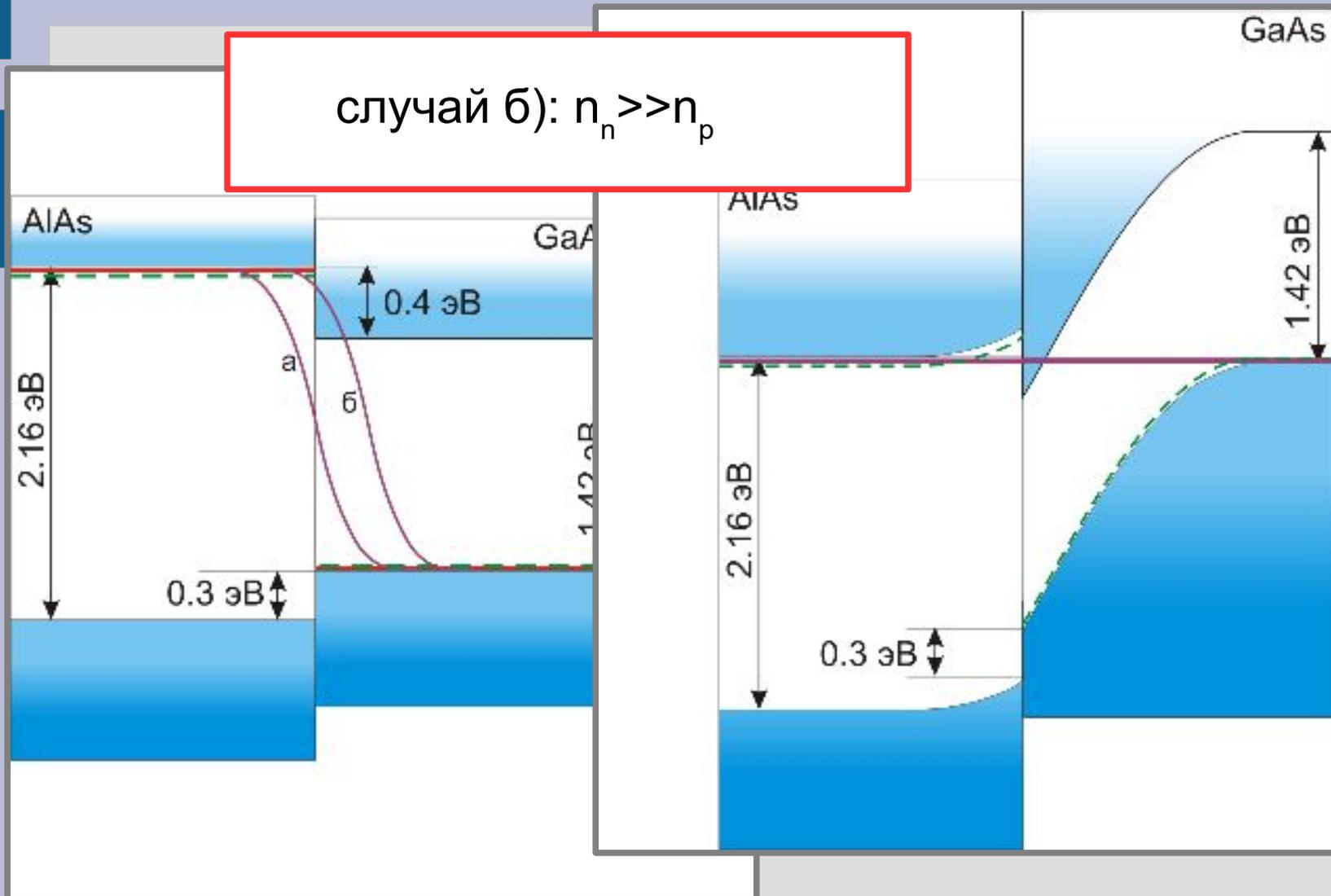


По правилу Андерсона разрыв дна
зоны проводимости $4.1 - 3.5 = 0.6 \text{ эВ}$

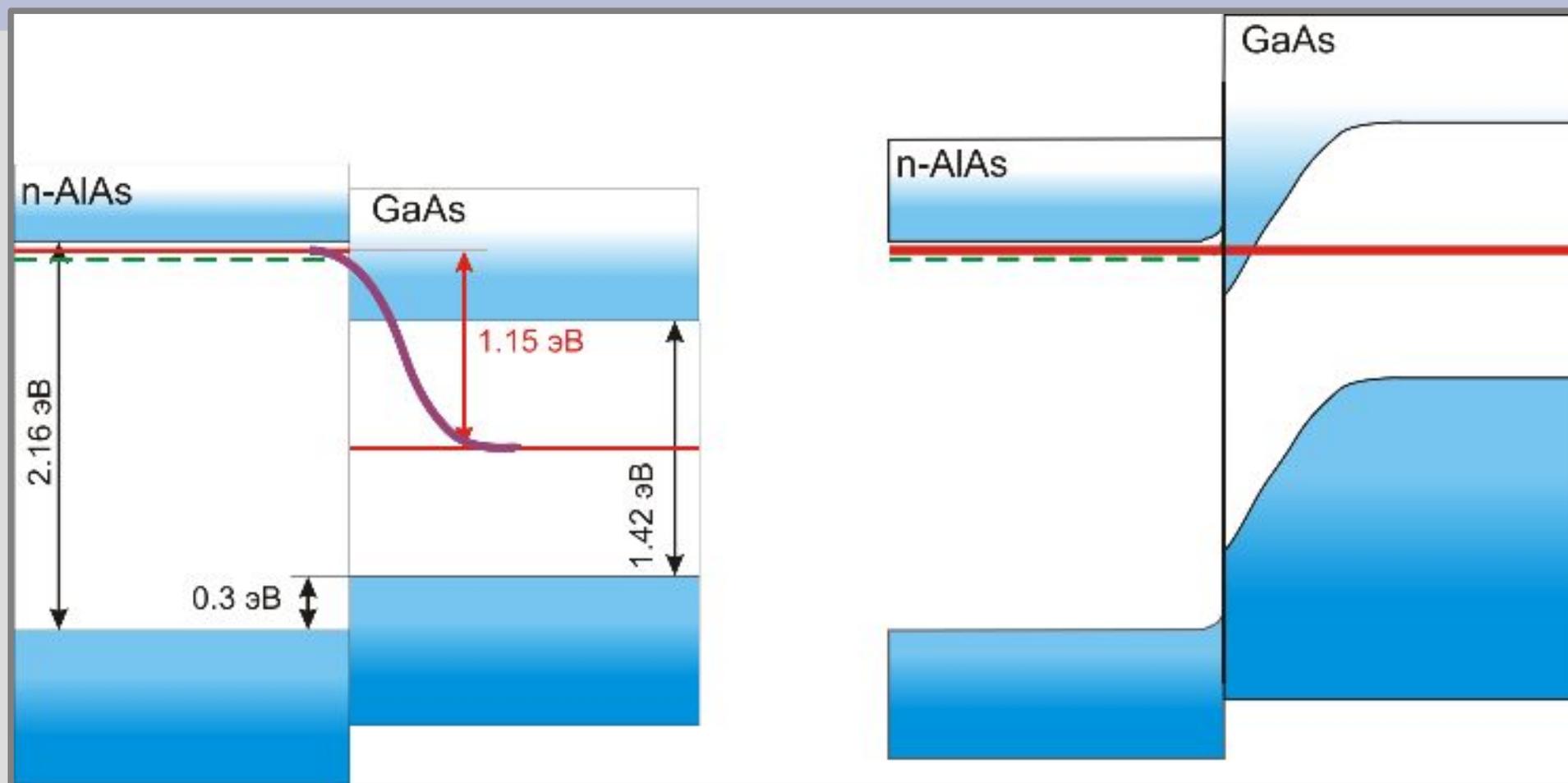
В действительности: 0.4 эВ

Энергетическая диаграмма гетероперехода nAlAs-pGaAs

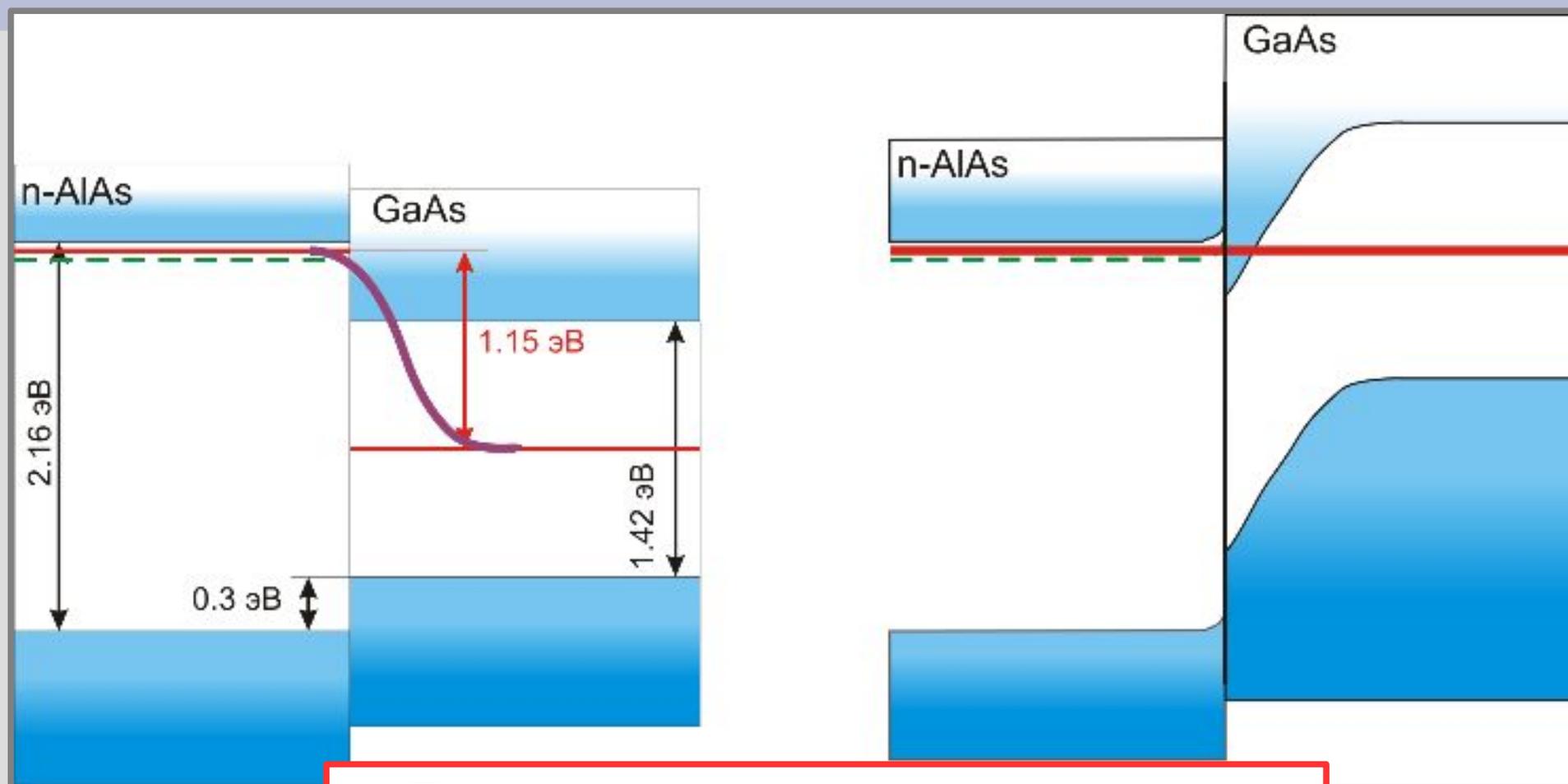
случай б): $n_n \gg n_p$



«Реалистичная» энергетическая диаграмма для сильно легированного n-AlAs



«Реалистичная» энергетическая диаграмма для сильно легированного n-AlAs



Треугольная потенциальная яма для электронов формируется **в недопированном GaAs!!!**

Основное на этой лекции.

$$\mu(\vec{r}) - e\phi(\vec{r}) = const$$

- Изгиб зон.
- Возможность формирования квантовой ямы на границе полупроводников.

