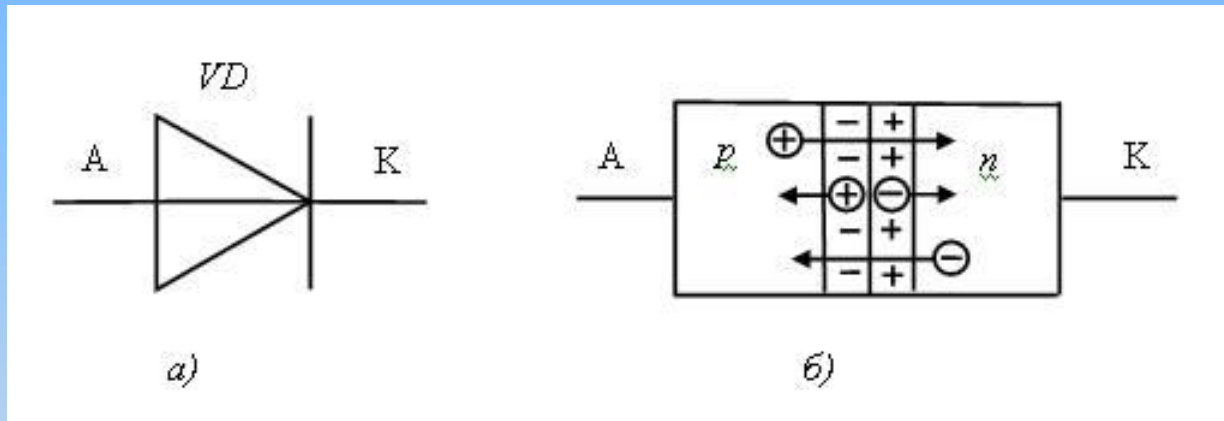




# *p-n-переход*

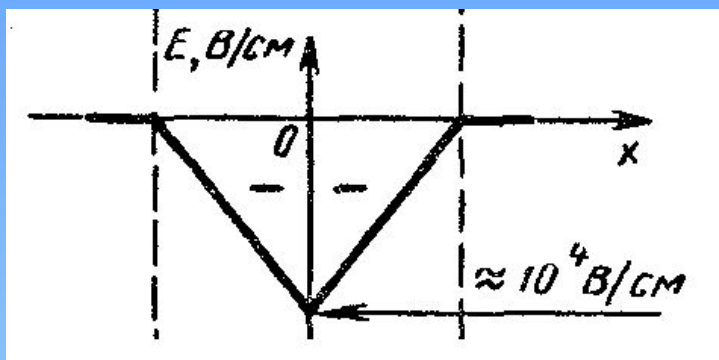
Контакт двух полупроводников одного вида с разным типом проводимости называется *электронно-дырочным* или *p-n-переходом*



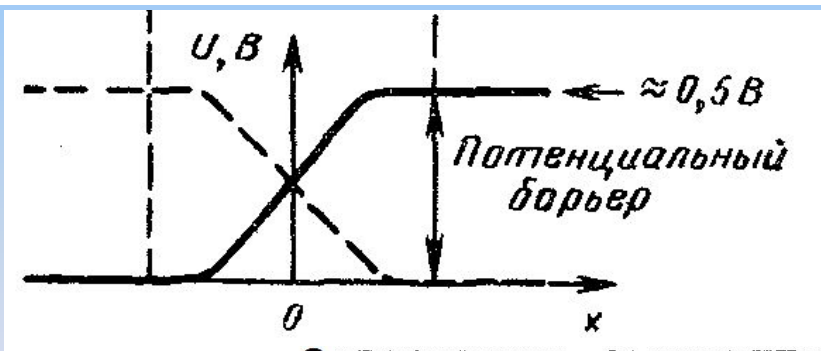
Условное обозначение (а) и структура (б)  
полупроводникового диода



## Электронно-дырочный переход плоскостной полупроводниковый диод

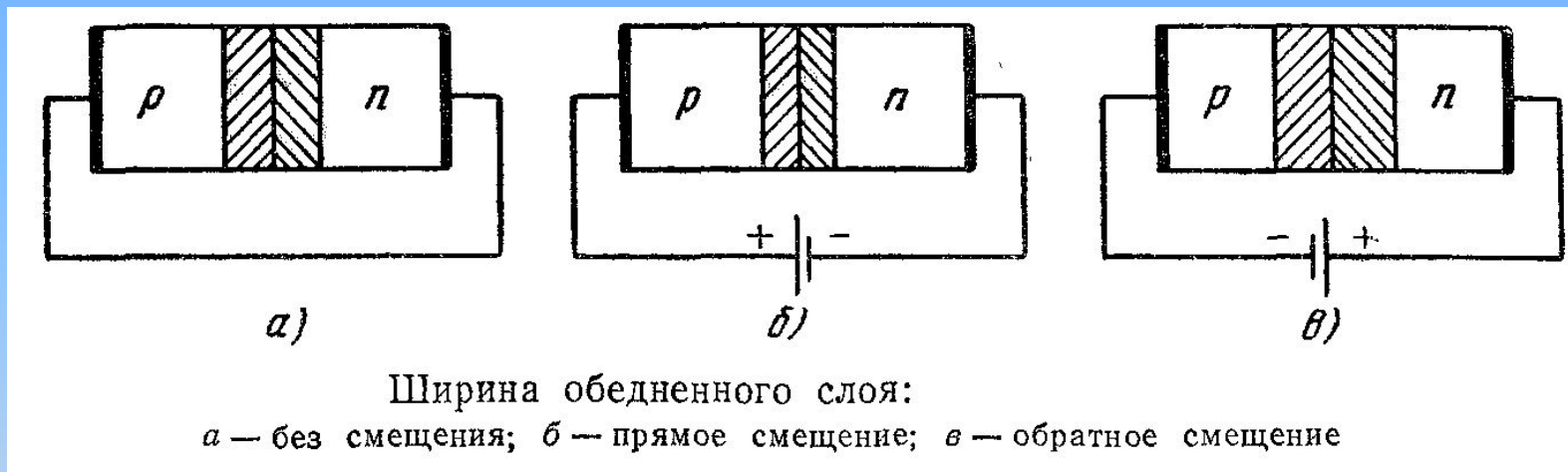


На рис. показана напряженность поля  $E$ . Она отрицательна, так как электрическое поле имеет направление, обратное (принятому за положительное) направлению отсчета расстояния  $x$ . При  $x=0$  напряженность поля порядка  $10^4$  В/см.



Зависимость электрического потенциала вдоль оси  $x$  от расстояния до границы раздела. Свободные положительные заряды-дырки находятся слева, и разность потенциалов рис. является для них потенциальным барьером, который они должны преодолеть, чтобы перейти слева направо.

## Вольт-амперная характеристика p-n перехода



Снабдив  $p$ - $n$  переход омическими контактами, одинаково хорошо проводящими ток в любом направлении, получим плоскостной диод.

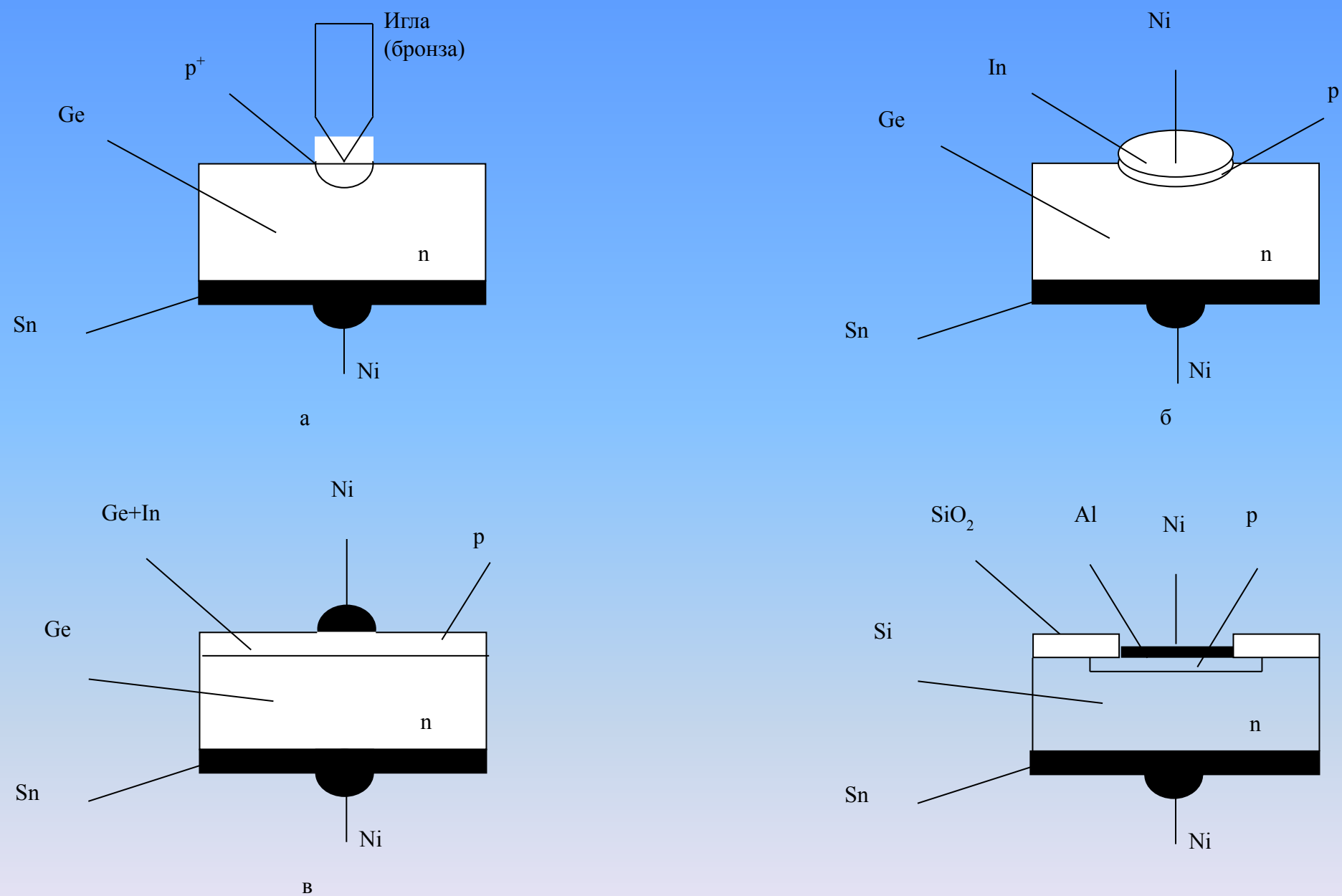


Рис. 1. Структуры полупроводниковых диодов: точечного (а); сплавного (б); диффузионного (в); планарного (г)

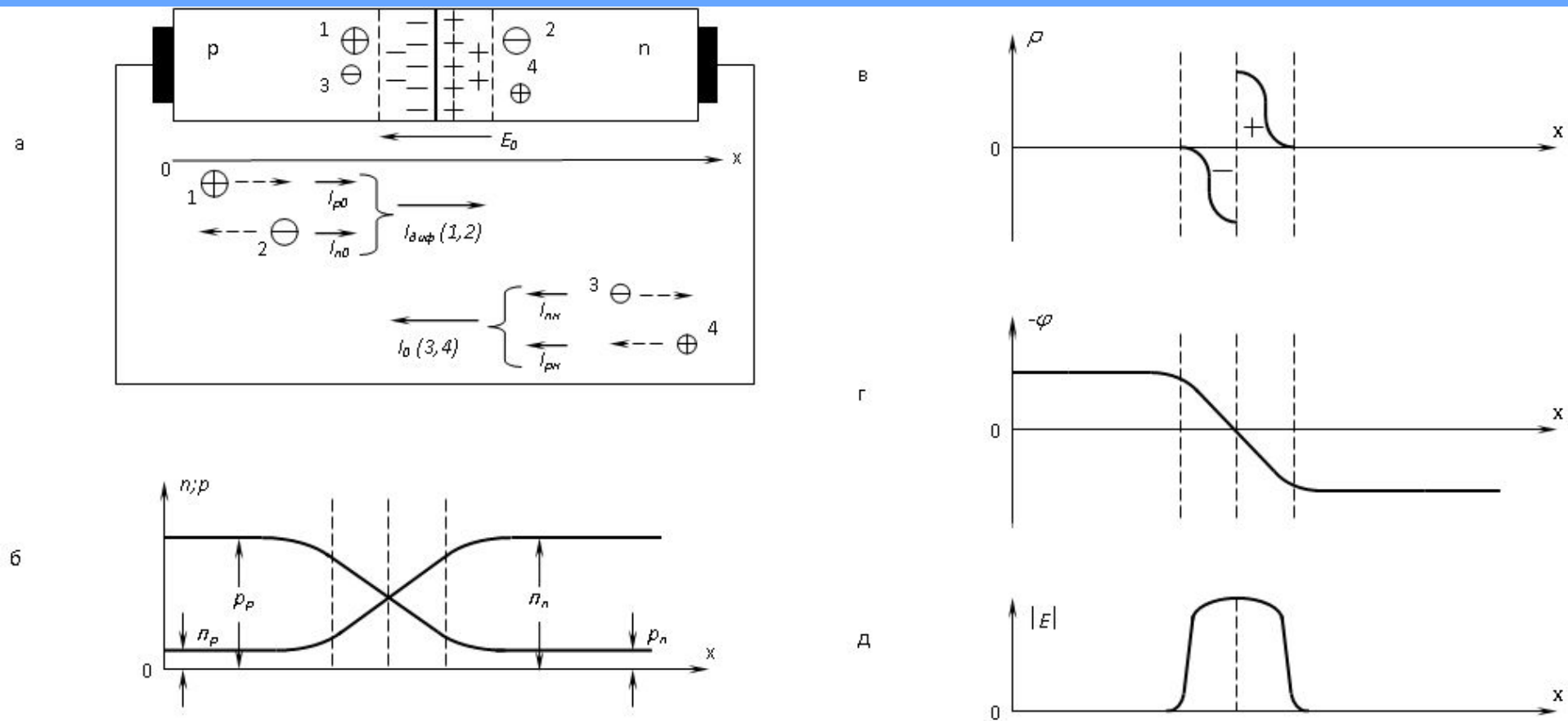


Рис. 2. Симметричный p-n – переход: а- схематичное изображение; б- концентрация подвижных носителей зарядов; в- объемная плотность подвижных зарядов; г-потенциал; д-напряженность поля

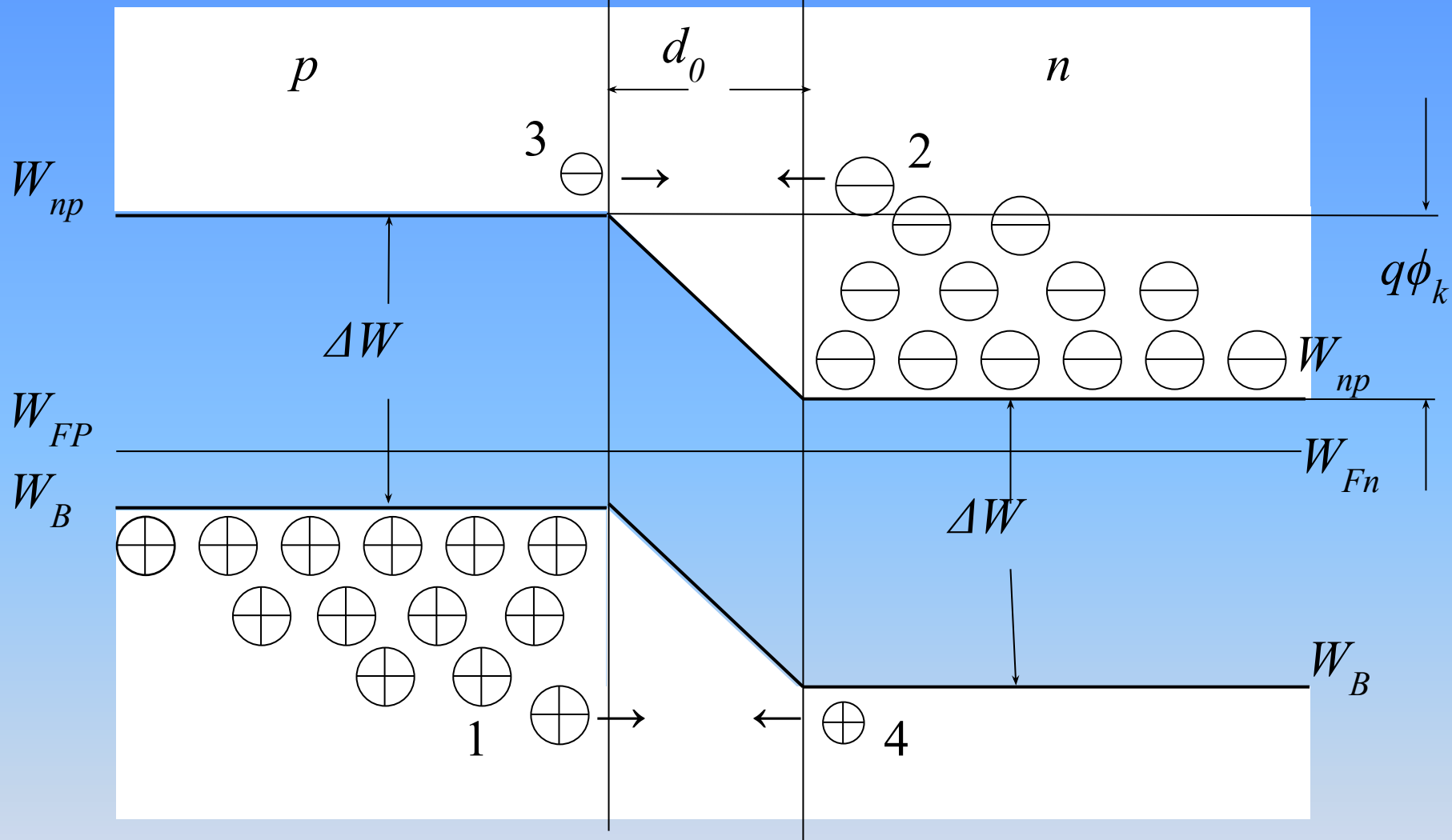


Рис.3. Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$ -перехода в равновесном состоянии

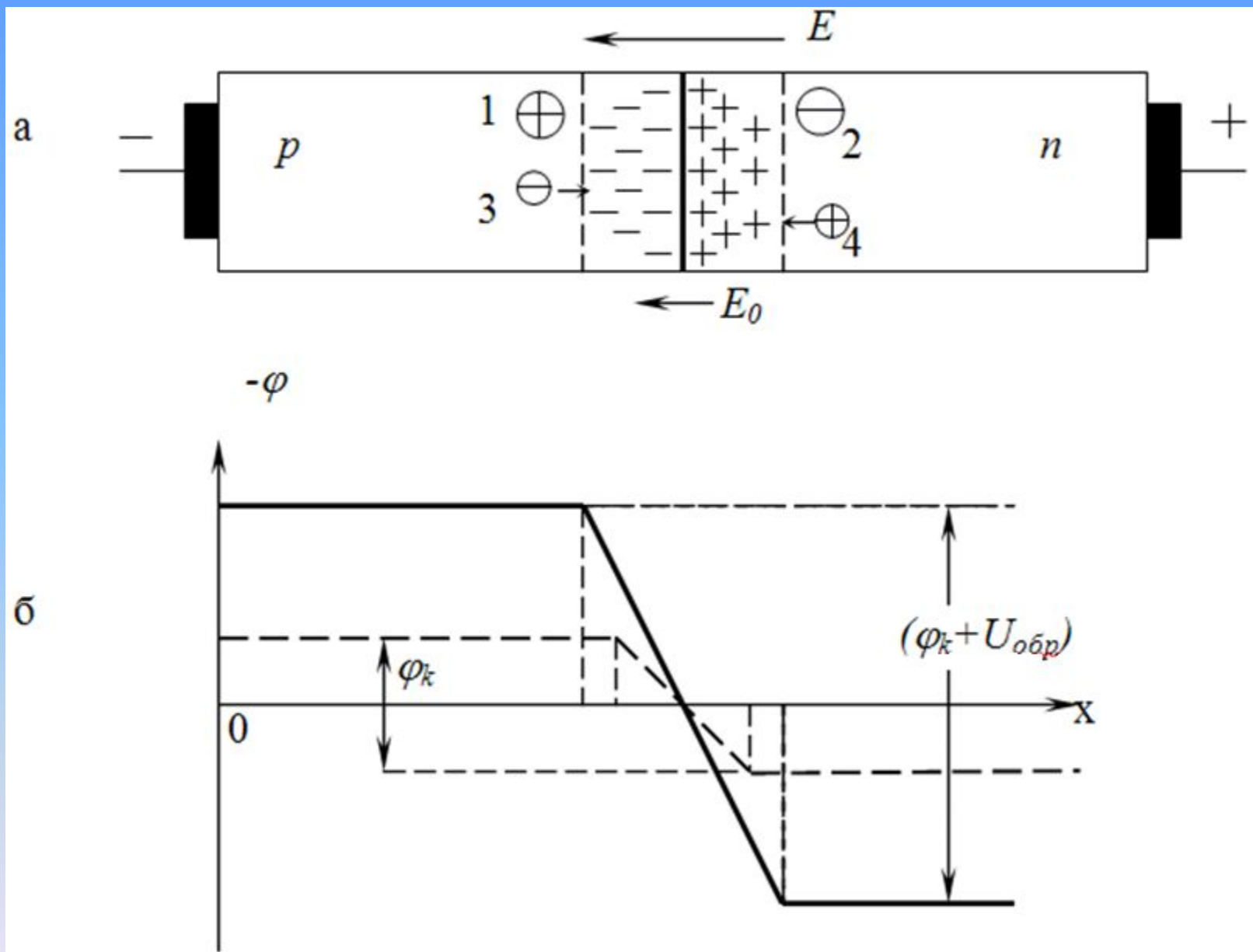


Рис.4. Обратносмещенный  $p$ - $n$ -переход: схематическое изображение (а), распределение потенциала (б)



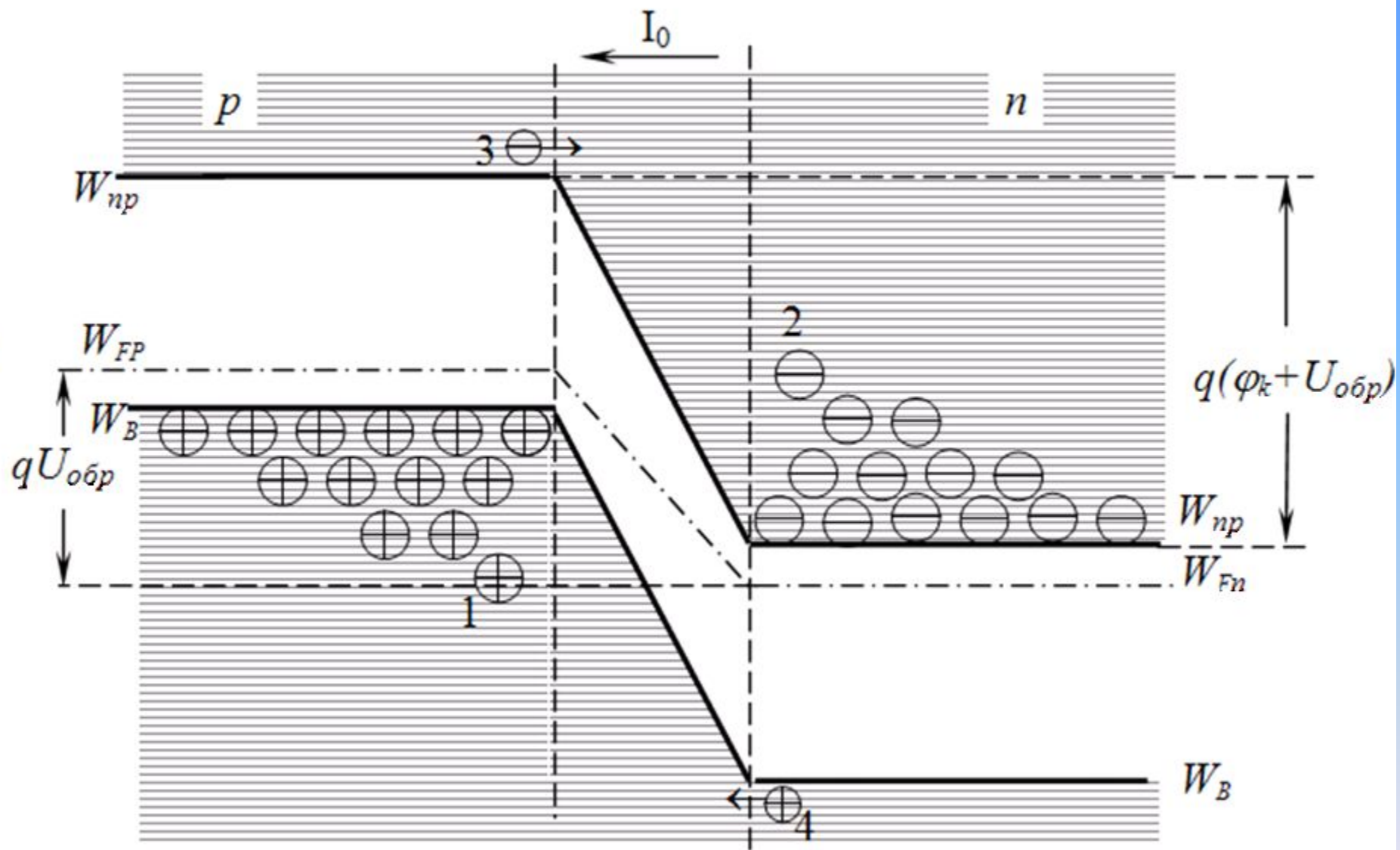


Рис.4. Обратносмещенный  $p$ - $n$ -переход: зонная диаграмма (в)

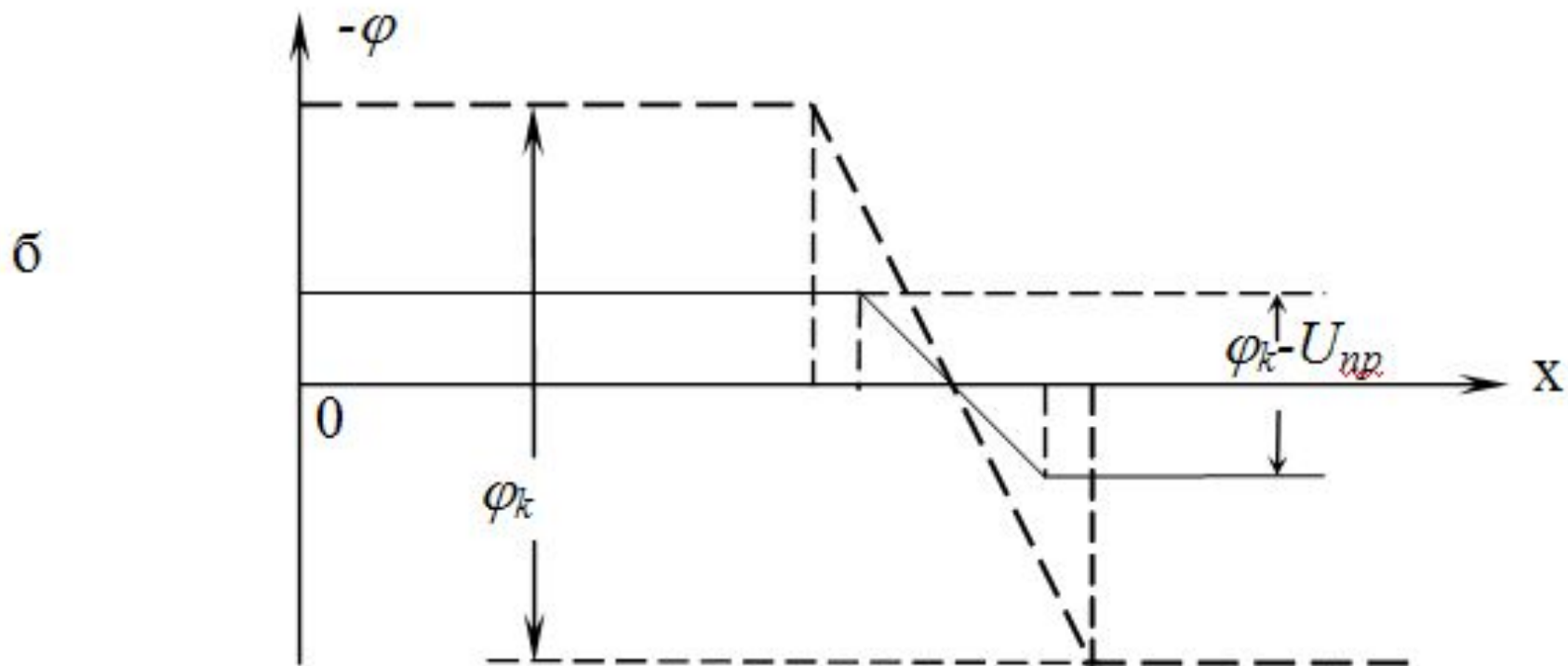
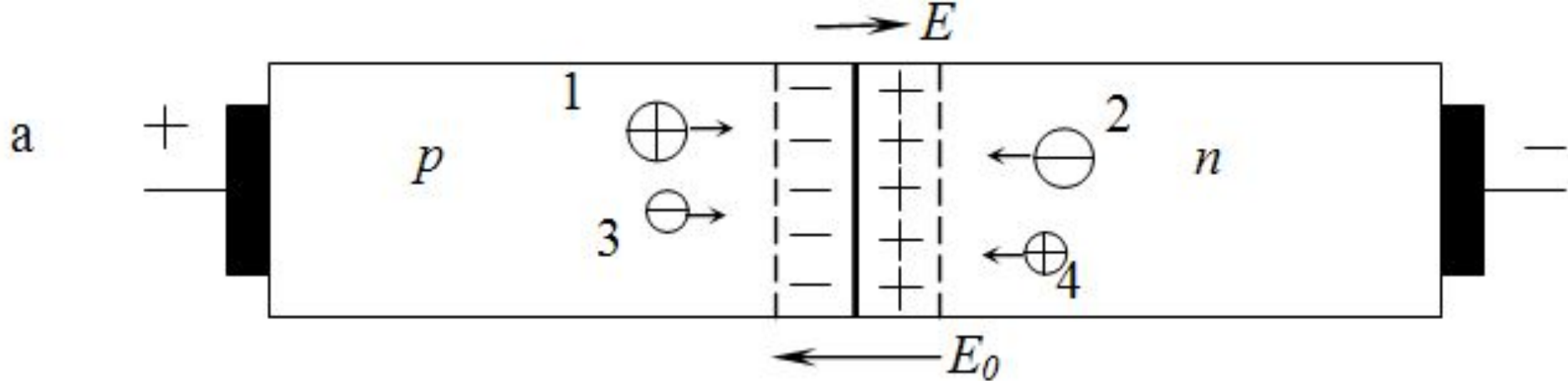


Рис.5. Прямо смещенный  $p$ - $n$ -переход: схематическое изображение (а), распределение потенциала (б)

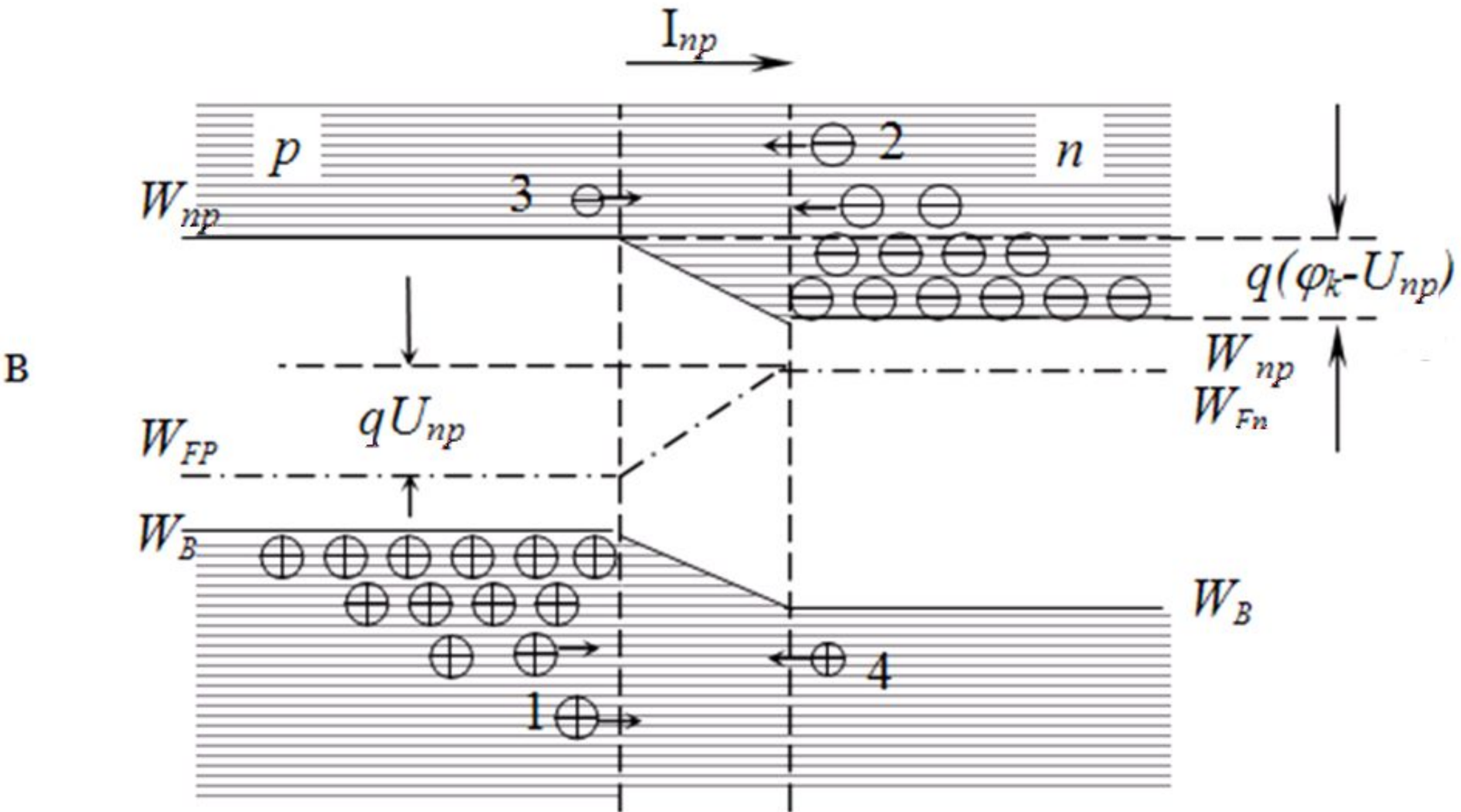


Рис. 5. Прямосмещенный  $p$ - $n$ -переход: зонная диаграмма (в)

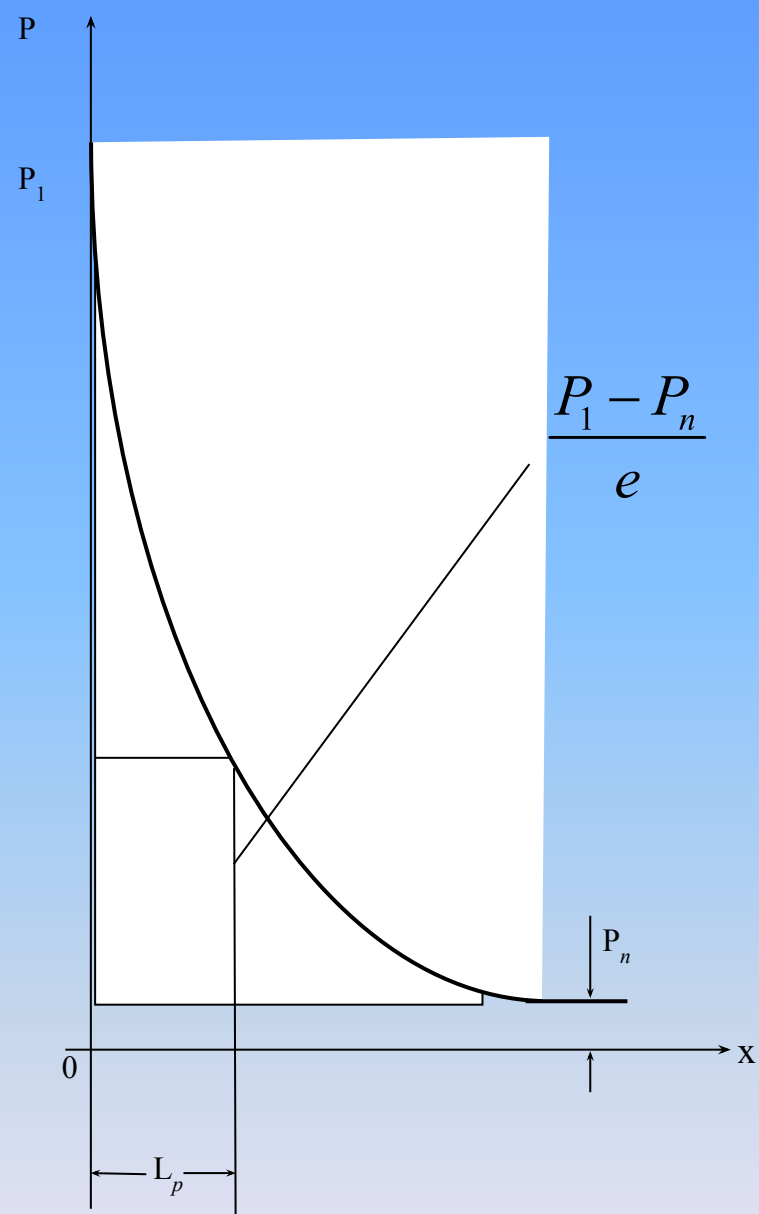


Рис.6. Распределение Концентрации дырок по толщине  $n$  – области

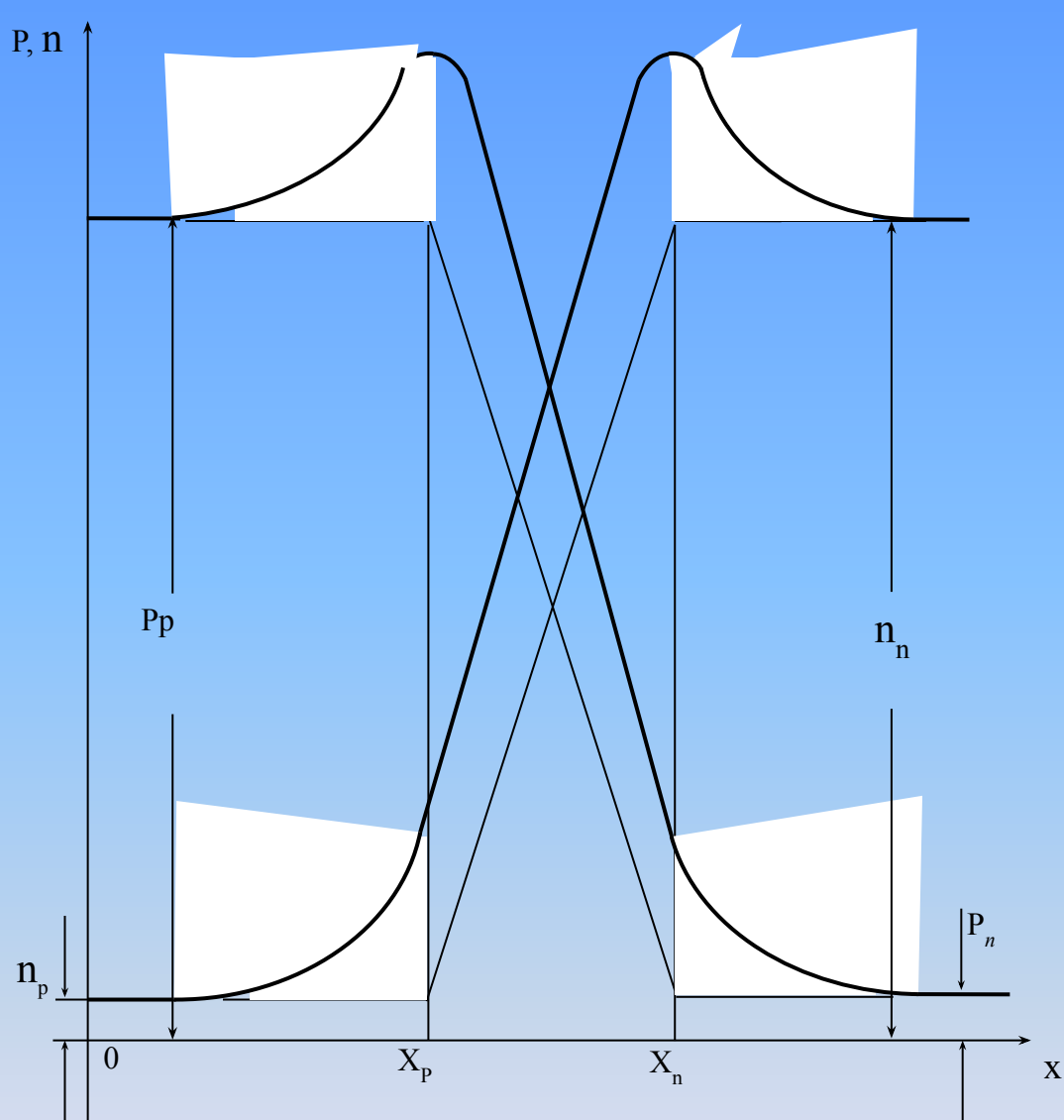


Рис.7. Распределение концентрации подвижных носителей по толщине полупроводникового диода

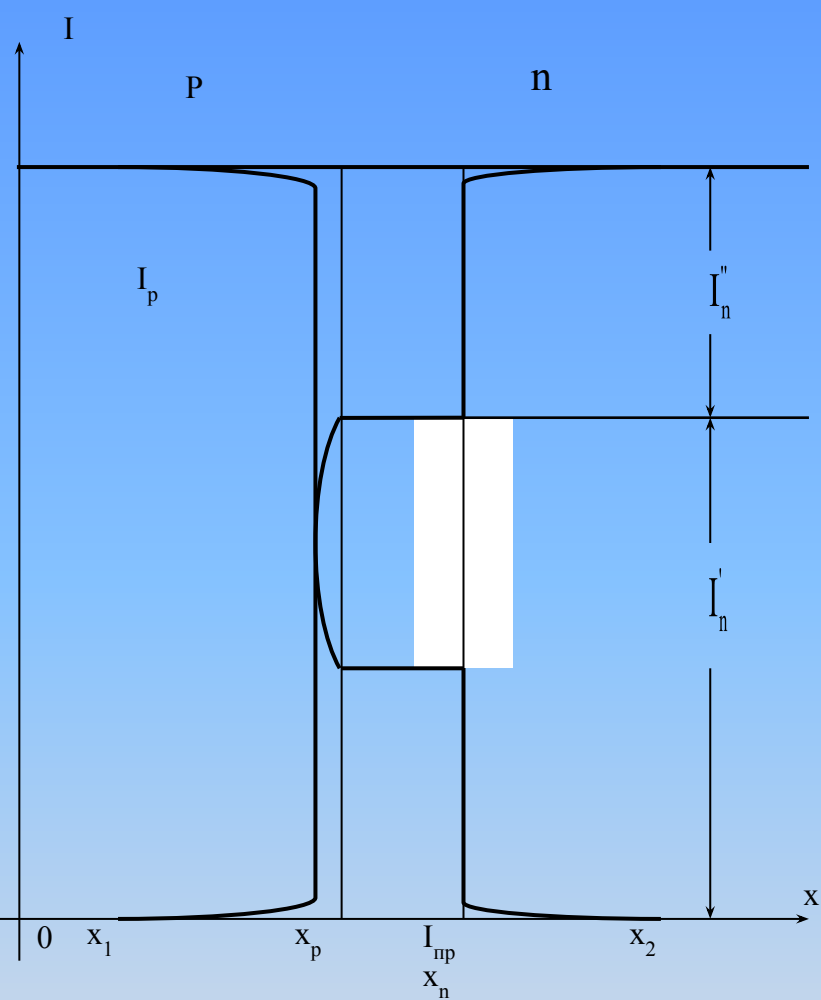


Рис.8. Распределение токов по длине симметричного  $p$ - $n$ -перехода при прямом включении

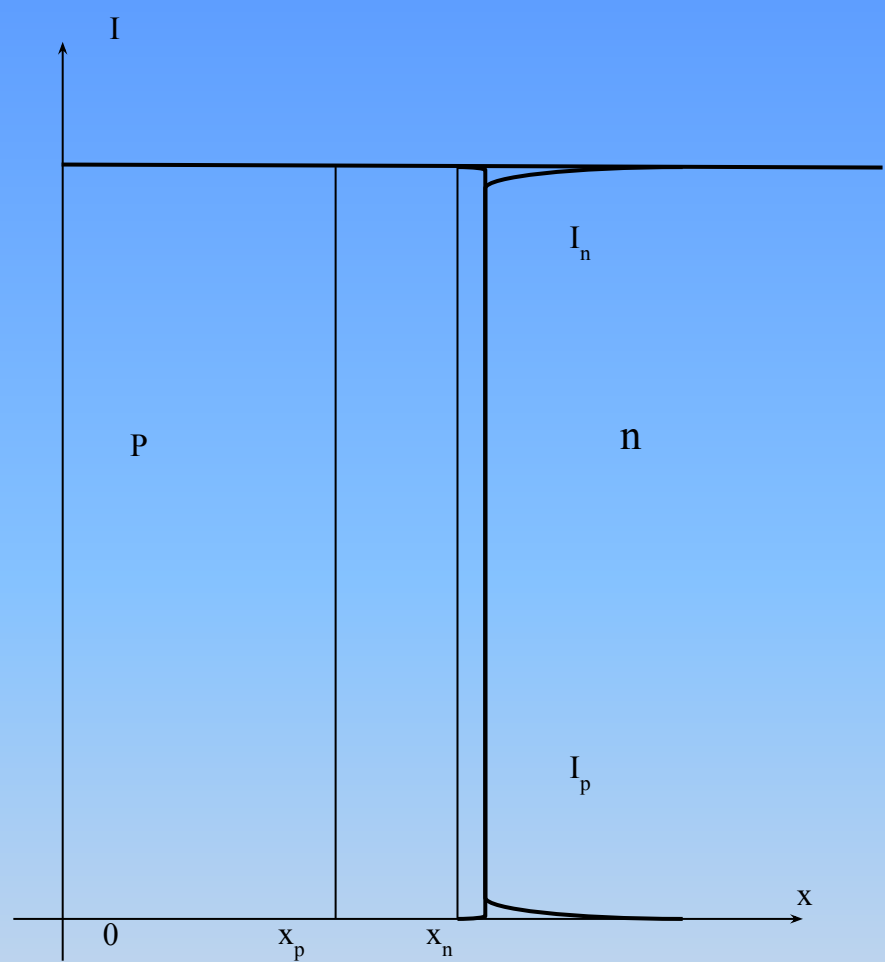


Рис.9. Распределение концентрации токов по длине резко несимметричного  $p^+$ - $n$ -перехода при прямом включении

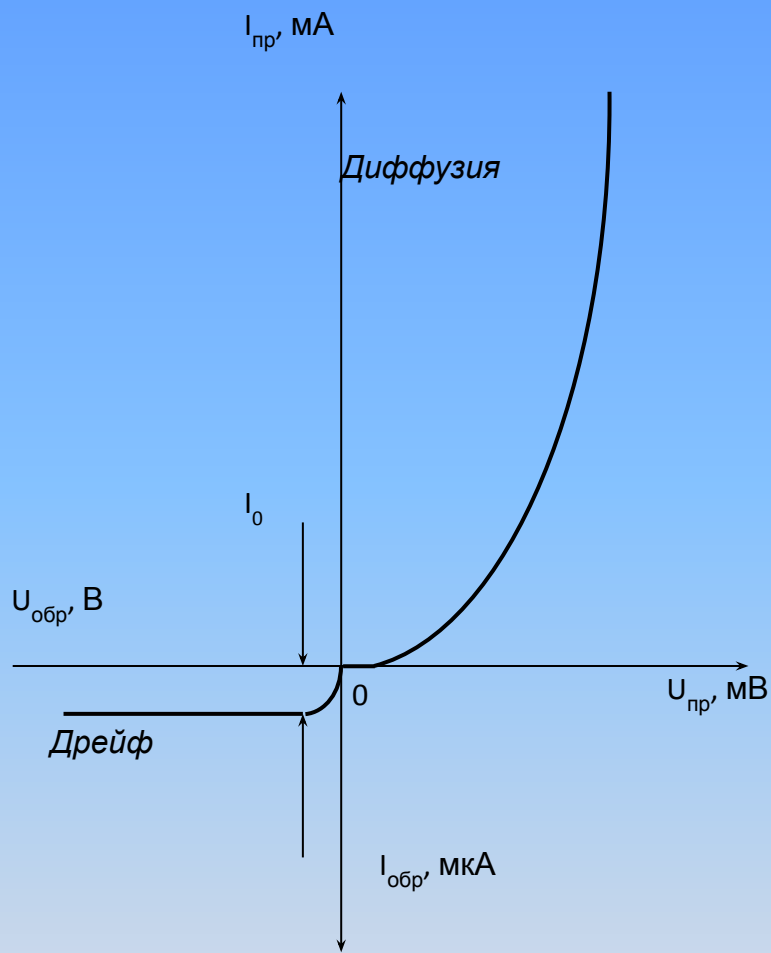


Рис.10. Вольт – амперная характеристика идеализированного  $p-n$ -перехода

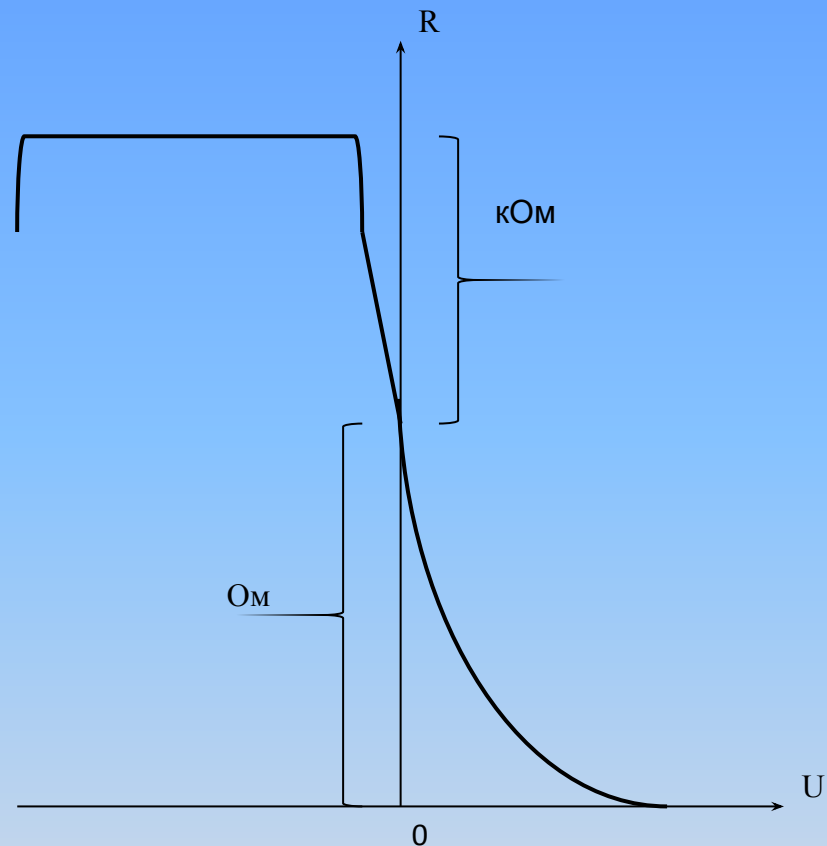
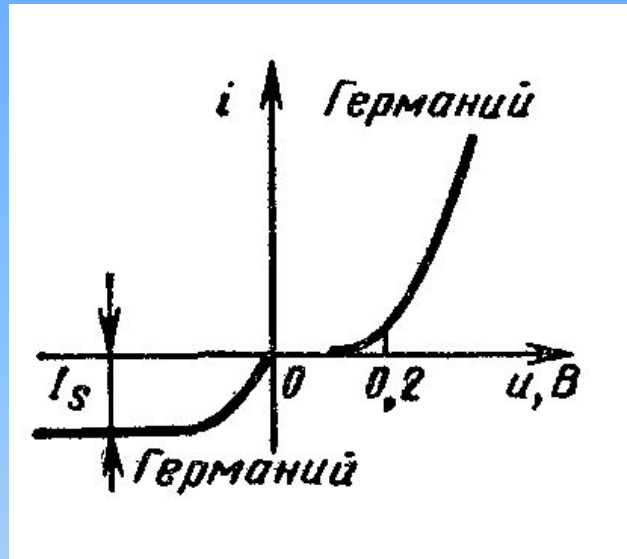


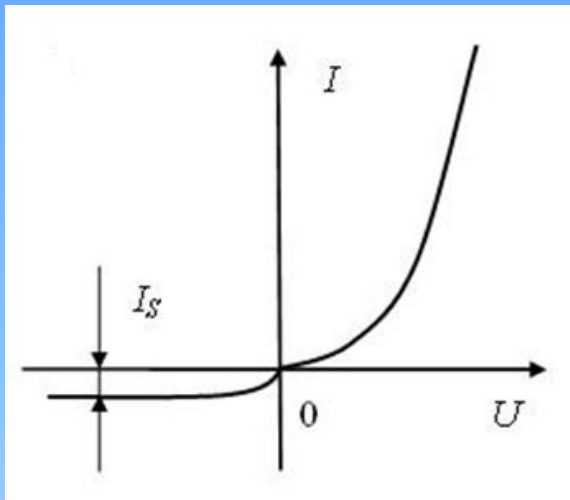
Рис.11. Вольт – омная характеристика  $p-n$ -перехода

## Вольт-амперная характеристика р-п перехода



Уже при сравнительно небольших отрицательных напряжениях обратный ток равен току насыщения  $I_s$ . Этот ток создается неосновными носителями: электронами  $p$ -области и дырками  $n$ -области, переходу которых из одной области в другую способствует потенциальный барьер вблизи границы раздела. При увеличении обратного напряжения ток не увеличивается, так как на границе перехода число неосновных носителей в единицу времени определяется лишь температурой и не зависит от приложенного извне напряжения, если оно не очень велико.

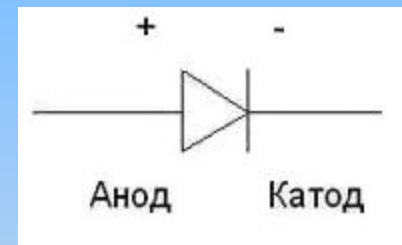
# Вольт-амперная (ВАХ) характеристика p-n перехода



Статическая вольт-амперная характеристика идеального диода

Диод – пассивный нелинейный полупроводниковый прибор, с двумя электродами – анодом и катодом.

Он проводит ток в прямом направлении, когда к аноду приложен положительный потенциал "+", а к катоду отрицательный "-". Он не проводит ток в обратном направлении. Называется пассивным, потому, что не усиливает мощность. Диод является нелинейным элементом, поэтому его ВАХ (вольт-амперная характеристика) нелинейная.



Когда диод начинает проводить ток, на нем возникает падение напряжения. Постоянный прямой ток  $I_{пр.}$  может быть 10-20 мА, постоянный обратный ток  $I_{обр.}$  1-2 мкА. - для диодов общего назначения,  $I_{обр.}$  обычно не принимают во внимание до тех пор, пока постоянное обратное напряжение  $U_{обр.}$  не достигнет напряжения пробоя, в этом случае  $I_{обр.}$  возрастает до значений  $I_{пр.}$  и диод выходит из строя,  $I_{пр.}$  также не может превышать  $I_{макс.}$  Германиевые диоды открываются при  $U_{пр.} = 0,2-0,4$  В, кремниевые - 0,6-0,8 В. Германиевые диоды имеют меньшее сопротивление в прямом направлении, чем кремниевые, порядка 100 Ом, их обратное сопротивление больше 100 000 Ом, прямые и обратные сопротивления у кремниевых диодов выше. С повышением температуры  $I_{пр.}$  и  $I_{обр.}$  увеличиваются. Д226 – германиевый диод. КД102 – кремниевый диод.



# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

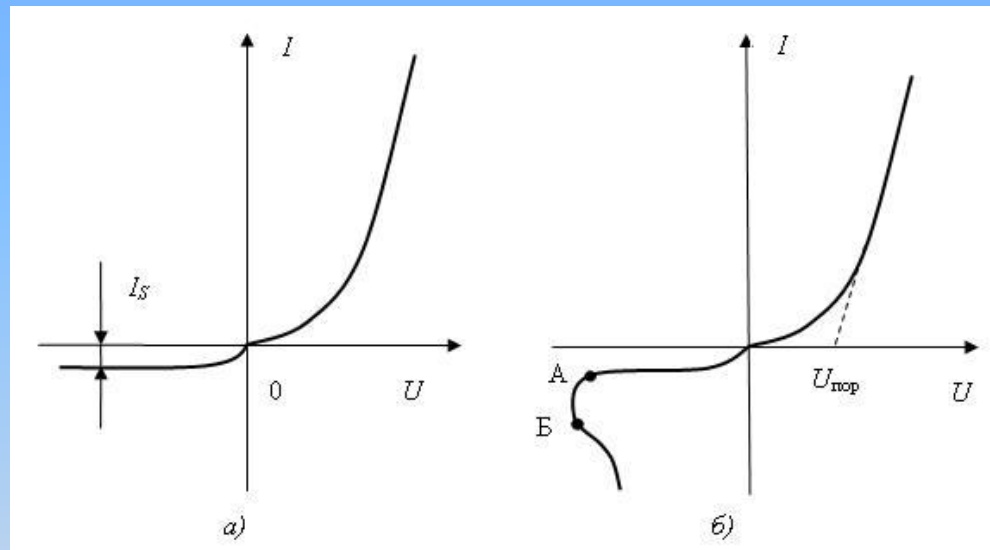
Зависимость тока через диод от напряжения на диоде называется вольт-амперной характеристикой диода. Теоретическое описание ВАХ идеального диода с  $p-n$ -переходом, полученное У. Шокли:

$$I = I_S \left( e^{U/\phi_T} - 1 \right),$$

где  $U$  – напряжение на  $p-n$ -переходе диода;

$I_S$  – ток насыщения;

$\phi_T = kT/q$  – тепловой потенциал при  $T = 300$  К,  $\phi_T = 25$  мВ.



Статические вольт-амперные характеристики идеального  $p-n$ -перехода (а) и реального диода (б)



# Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры.

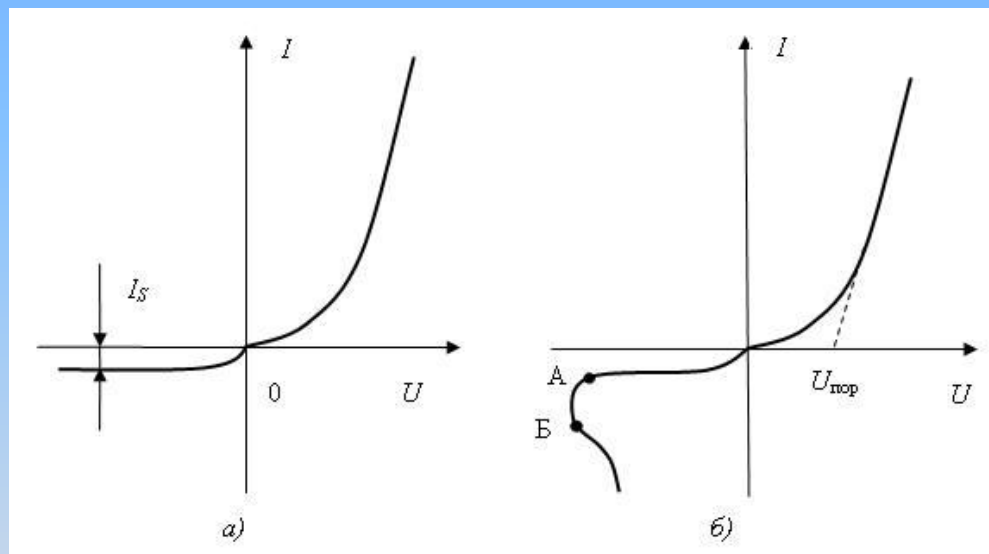
## Влияние внешних условий на характеристики и параметры

При положительных и отрицательных напряжениях  $U$ , больших по модулю  $0,1$  В, ВАХ описывается упрощенным выражением:

$$I = I_S e^{U/\varphi_T}.$$

При протекании большого прямого тока через диод падение напряжения возникает не только на  $p-n$ -переходе, но и на объемном сопротивлении полупроводника  $R$ . Реальная ВАХ описывается выражением

$$I = I_S e^{(U-IR)/\varphi_T}.$$



Статические вольт-амперные характеристики идеального  $p-n$ -перехода (а) и реального диода (б)



## Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

### Параметры полупроводникового диода

- Коэффициент выпрямления  $K_B$ , который определяется как отношение прямого тока к обратному при одинаковой (по модулю) величине прямого и обратного напряжений (например:  $\pm 0,01$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 1$  В).

Для идеального диода  $K_B = 1$  при  $U = \pm 0,01$  В. При  $U = \pm 1$  В  $K_B = 2,8 \cdot 10^{20}$

- Максимально допустимый прямой ток  $I_{пр\ max}$ , превышение которого приводит к недопустимому разогреву и тепловому пробую.  $I_{пр\ max}$  справочное значение.
- Свойства полупроводниковых диодов сильно зависят от температуры.



## Выпрямительные полупроводниковые диоды. Характеристики и параметры. Влияние внешних условий на характеристики и параметры

### Параметры полупроводникового диода (продолжение)

- Максимально допустимое обратное напряжение  $U_{\text{обр max}}$  – важный предельный параметр выпрямительных диодов и составляет для диодов малой мощности десятки-сотни вольт.

- Дифференциальное сопротивление диода:  $r_{\text{д}} = dU / dI$ .

- Статическое сопротивление диода (сопротивление постоянному току):

$$R_{\text{д.ст}} = U / I.$$



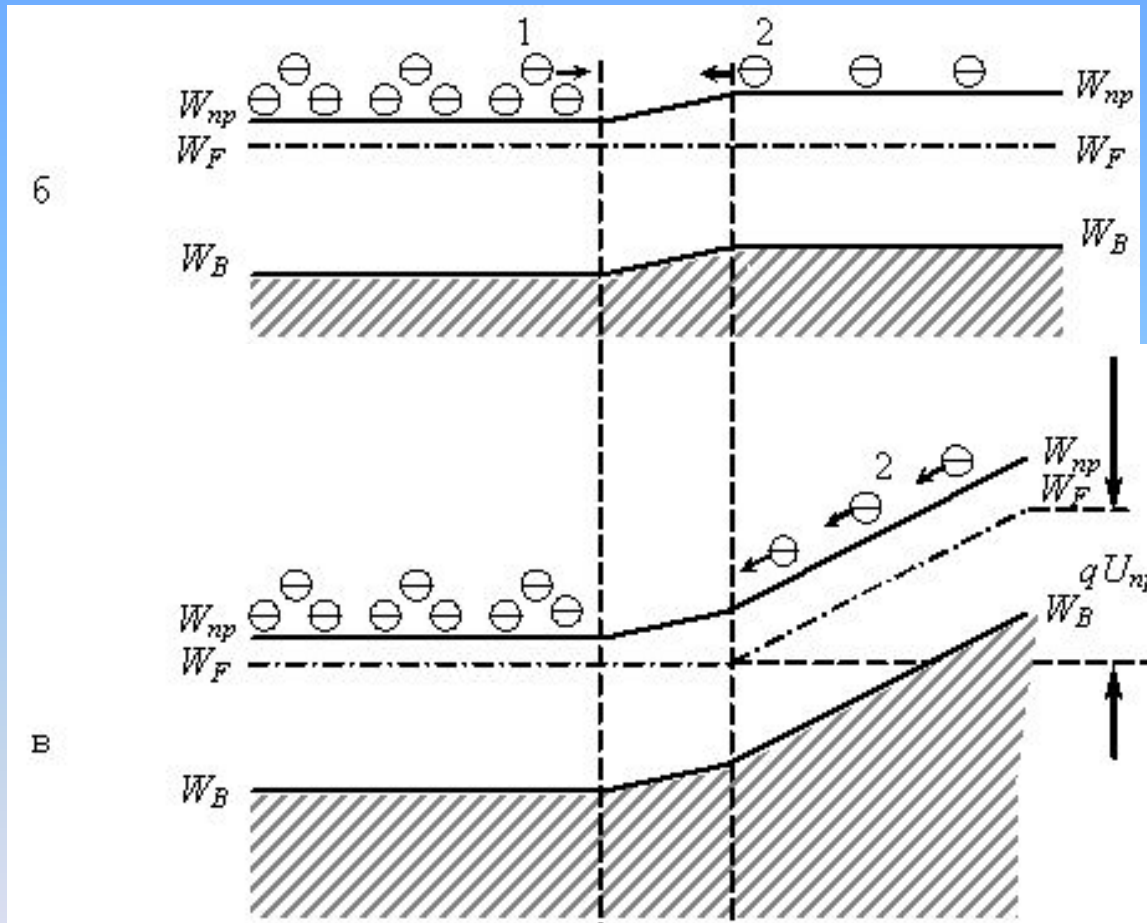
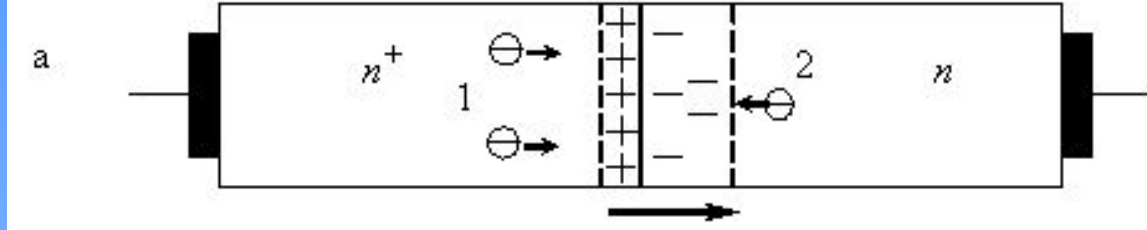


Рис. 12. Электрический переход типа  $n^+ - n$ : схематическое изображение (а), зонные диаграммы для равновесного состояния (б), при прямом включении (в)

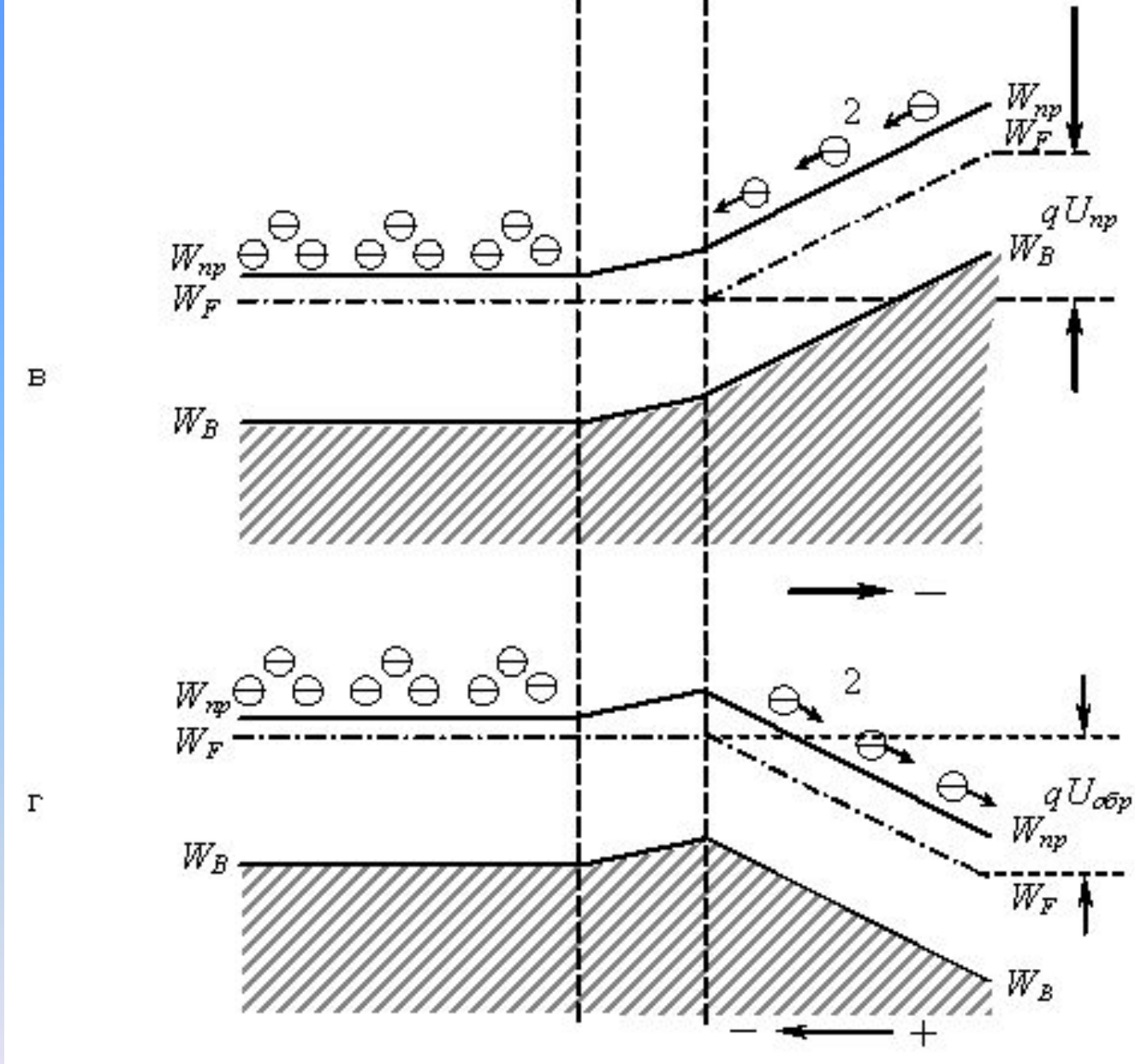


Рис. 12. Электрический переход типа  $n^+ - n$ : при прямом включении (в), при обратном включении (г)

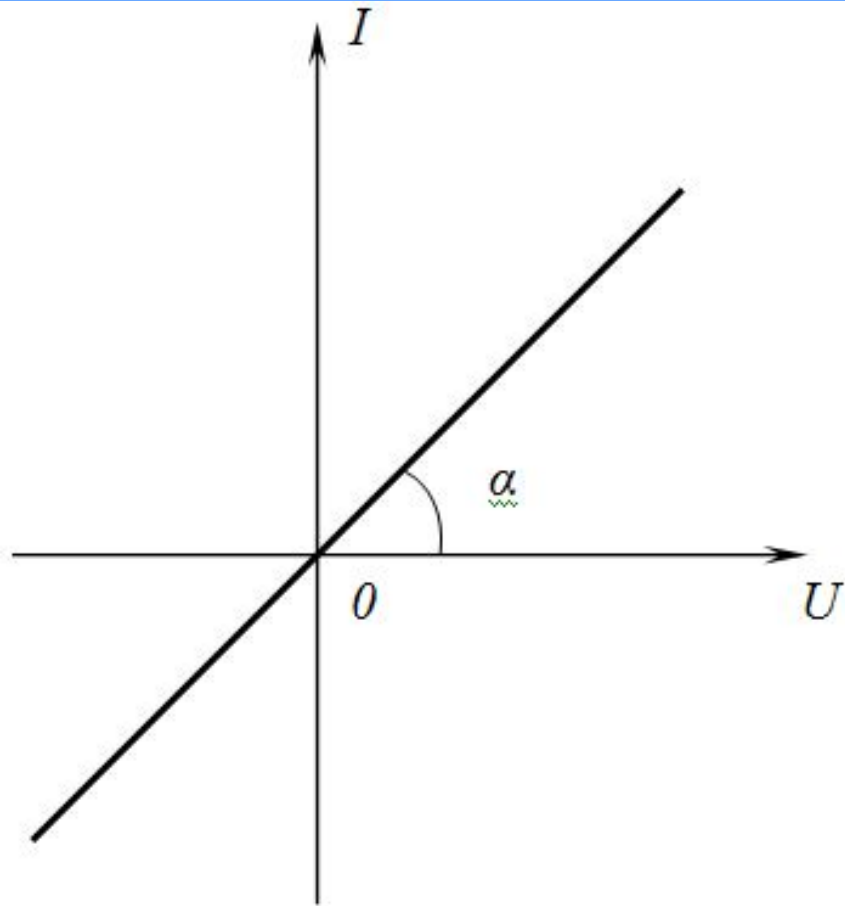


Рис.13. Вольт – амперная характеристика идеализированного  $n^+ - n$ -перехода

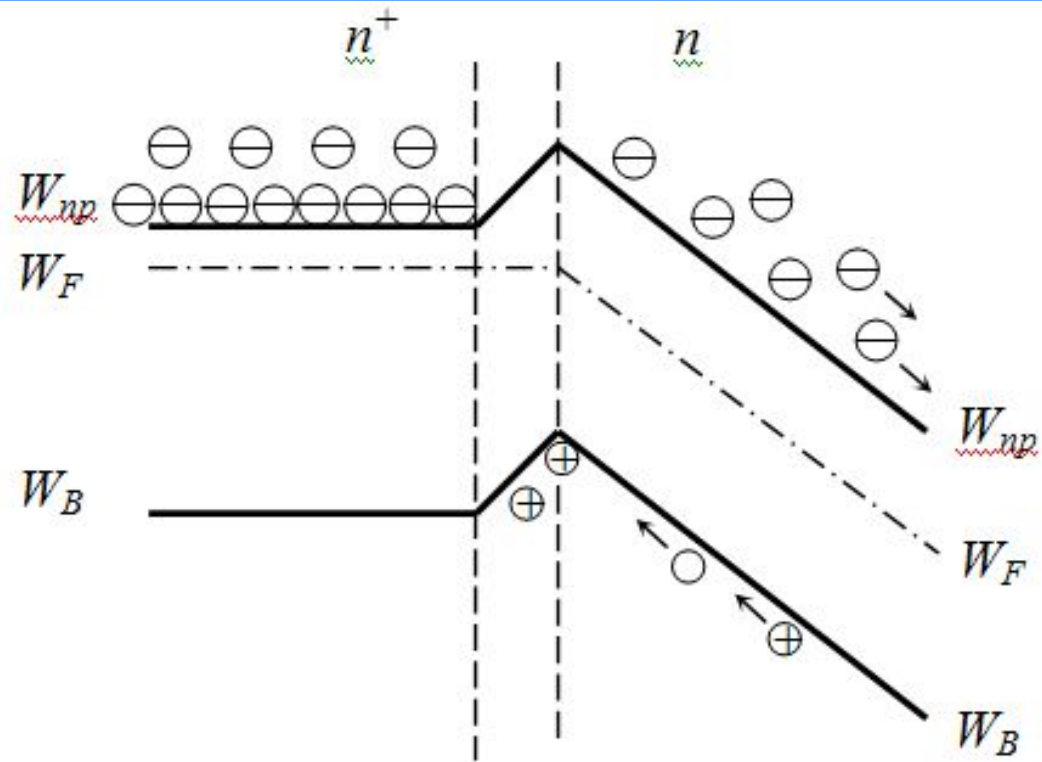


Рис.14. Накопление неосновных носителей заряда (дырок)  $n^+ - n$ -перехода при наличии внешнего поля

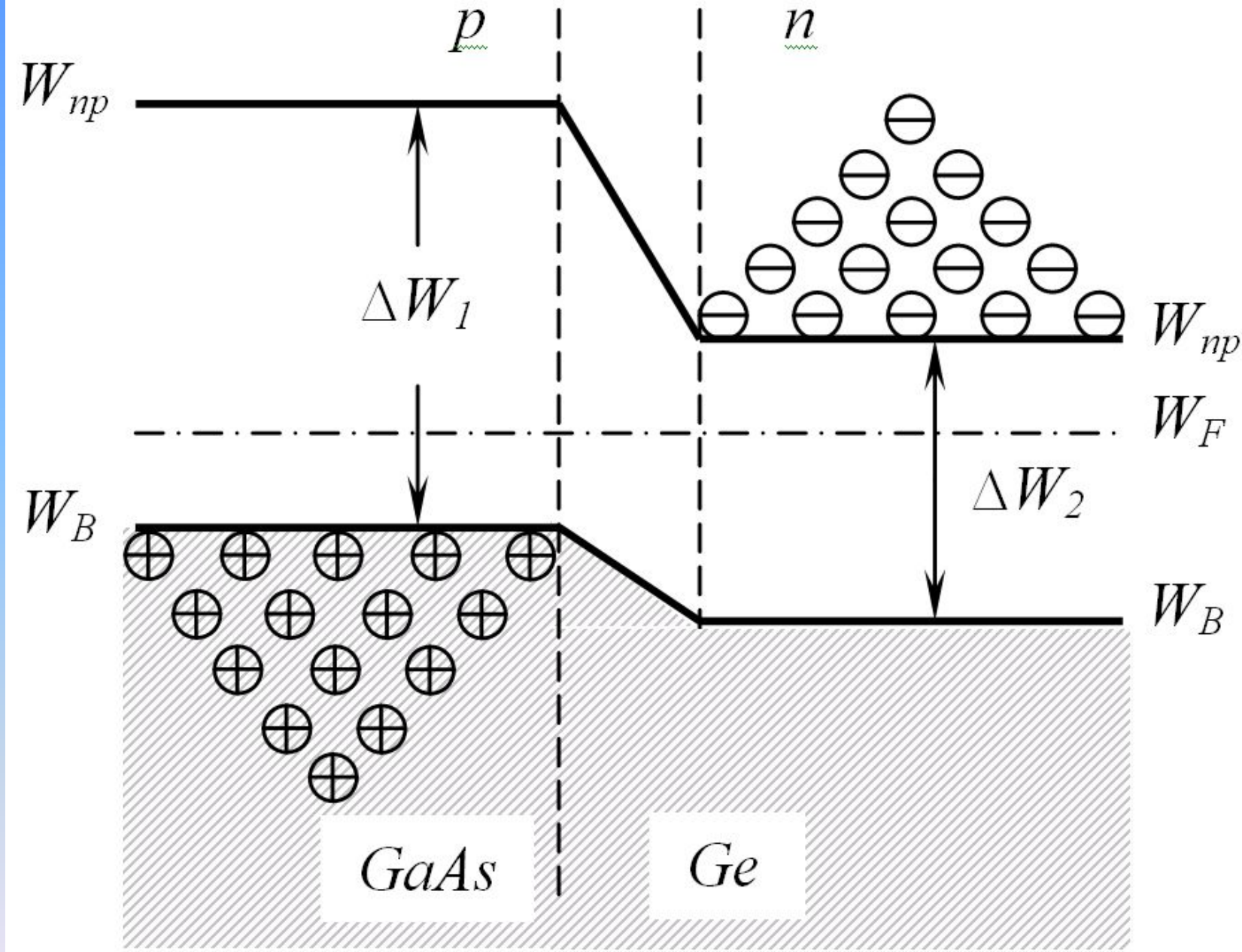


Рис. 15. Диаграмма энергетических уровней  $p$ - $n$ -гетероперехода в равновесном состоянии



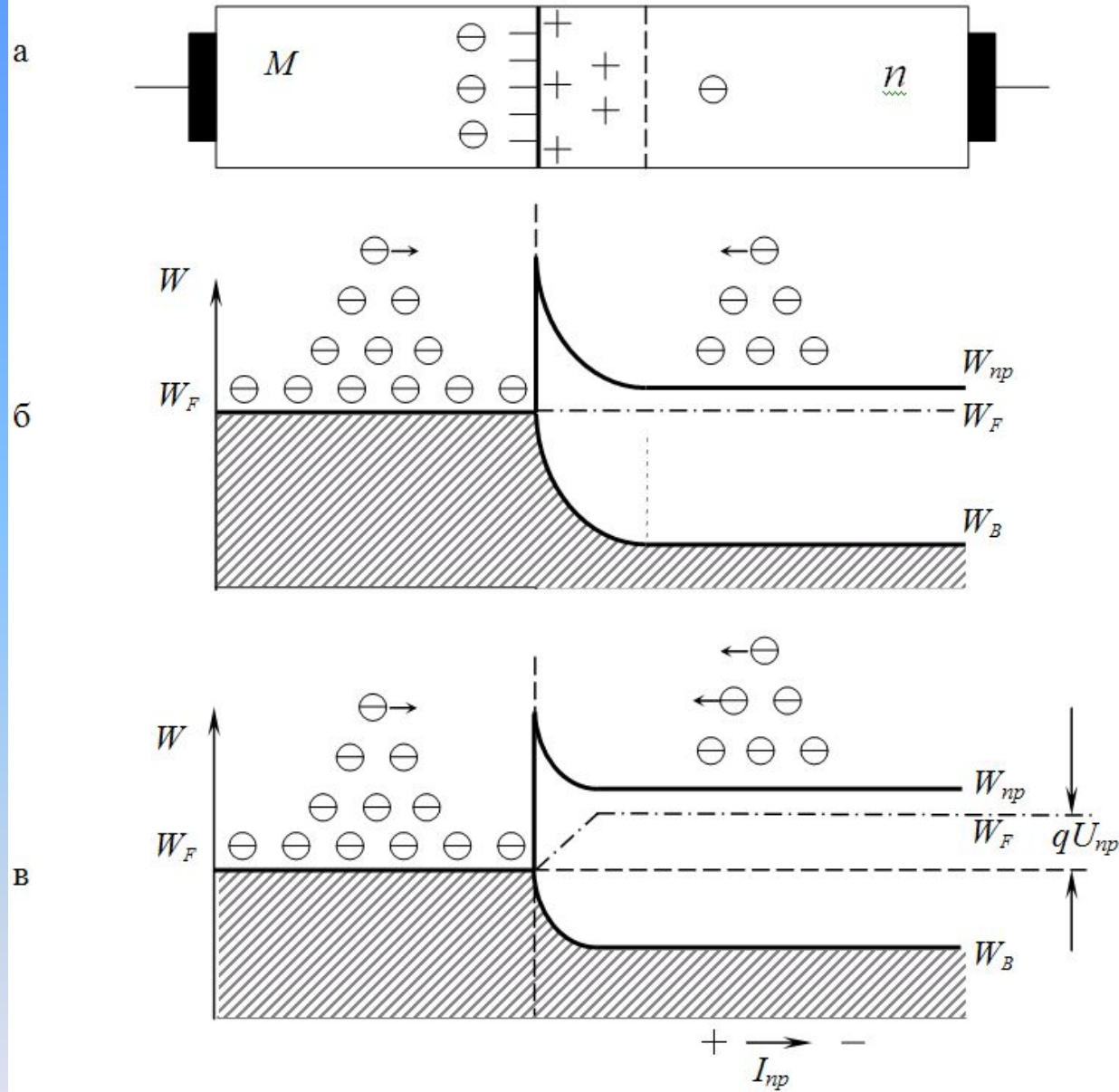


Рис. 16. Контакт металла и  $n$ -полупроводника ( $W_{OM} > W_{ON}$ ):  
схематическое изображение перехода (а); зонные диаграммы для  
равновесного состояния (б); при прямом включении (в).

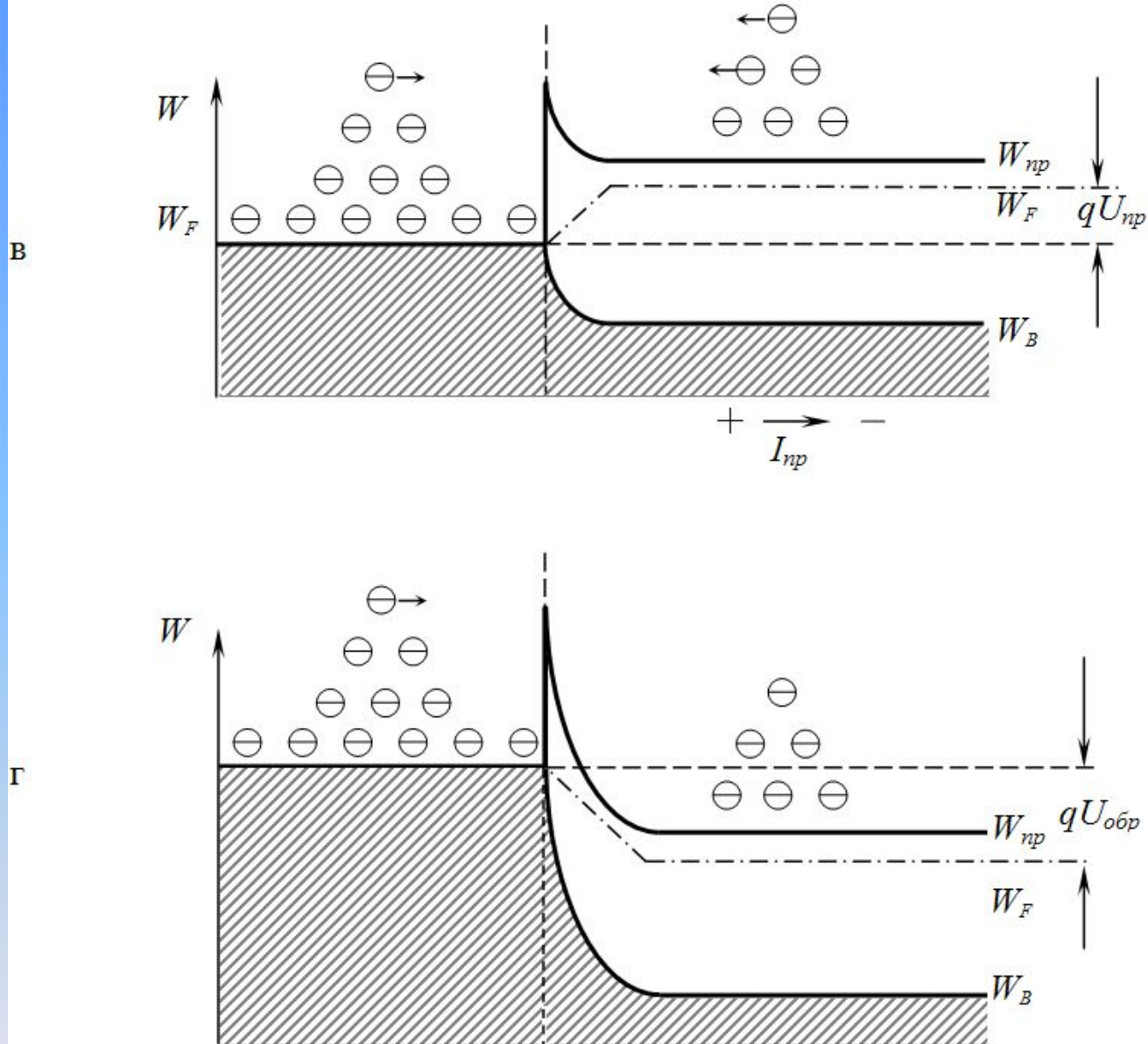


Рис. 16. Контакт металла и  $n$ -полупроводника ( $W_{ом} > W_{оп}$ ): зонные диаграммы для равновесного состояния (б); при прямом включении (в); при обратном включении (г)

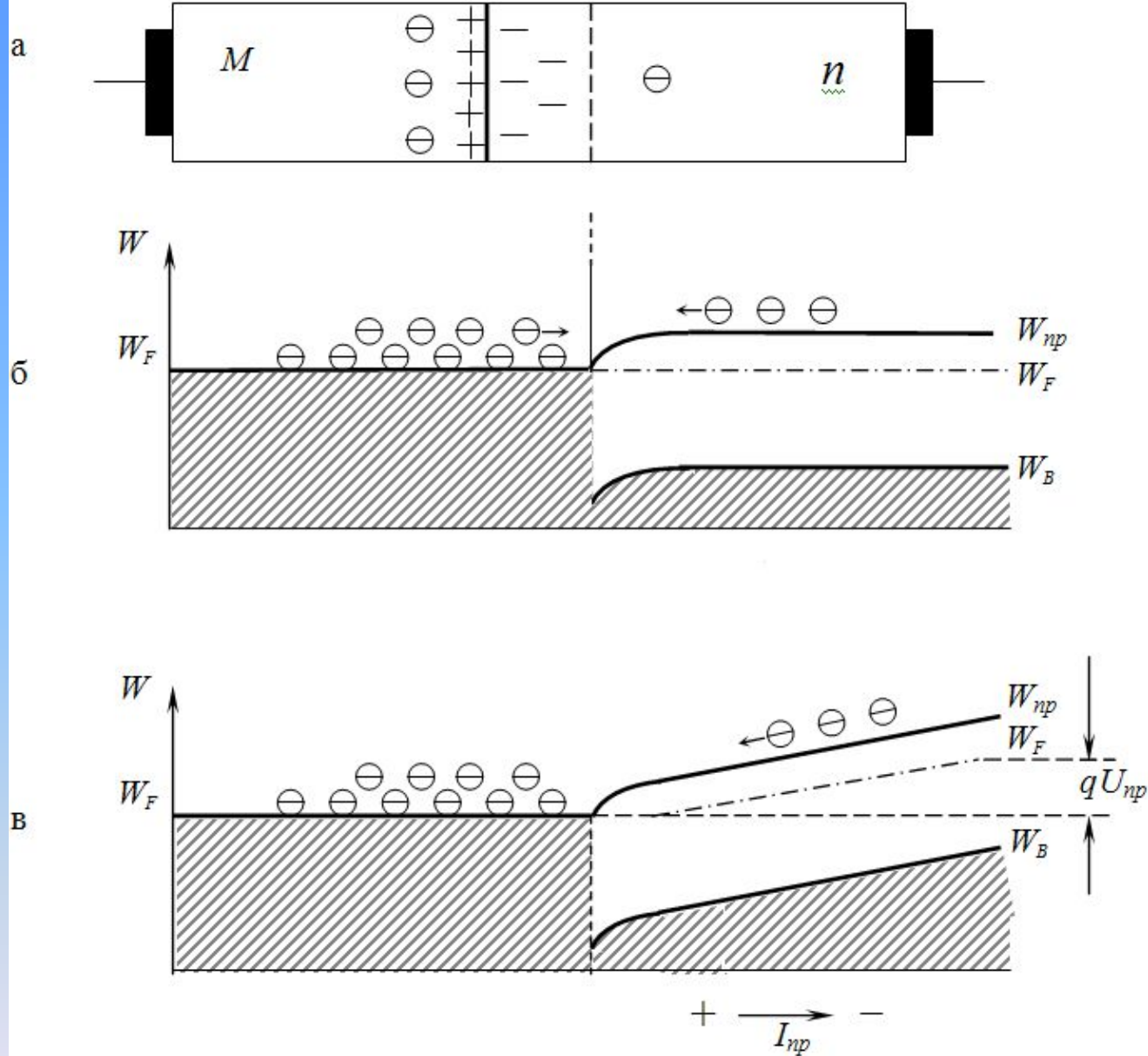


Рис. 17. Контакт металла и  $n$ -полупроводника ( $W_{ом} < W_{оп}$ ):  
схематическое изображение перехода (а); зонные диаграммы для  
равновесного состояния (б); при прямом включении (в)

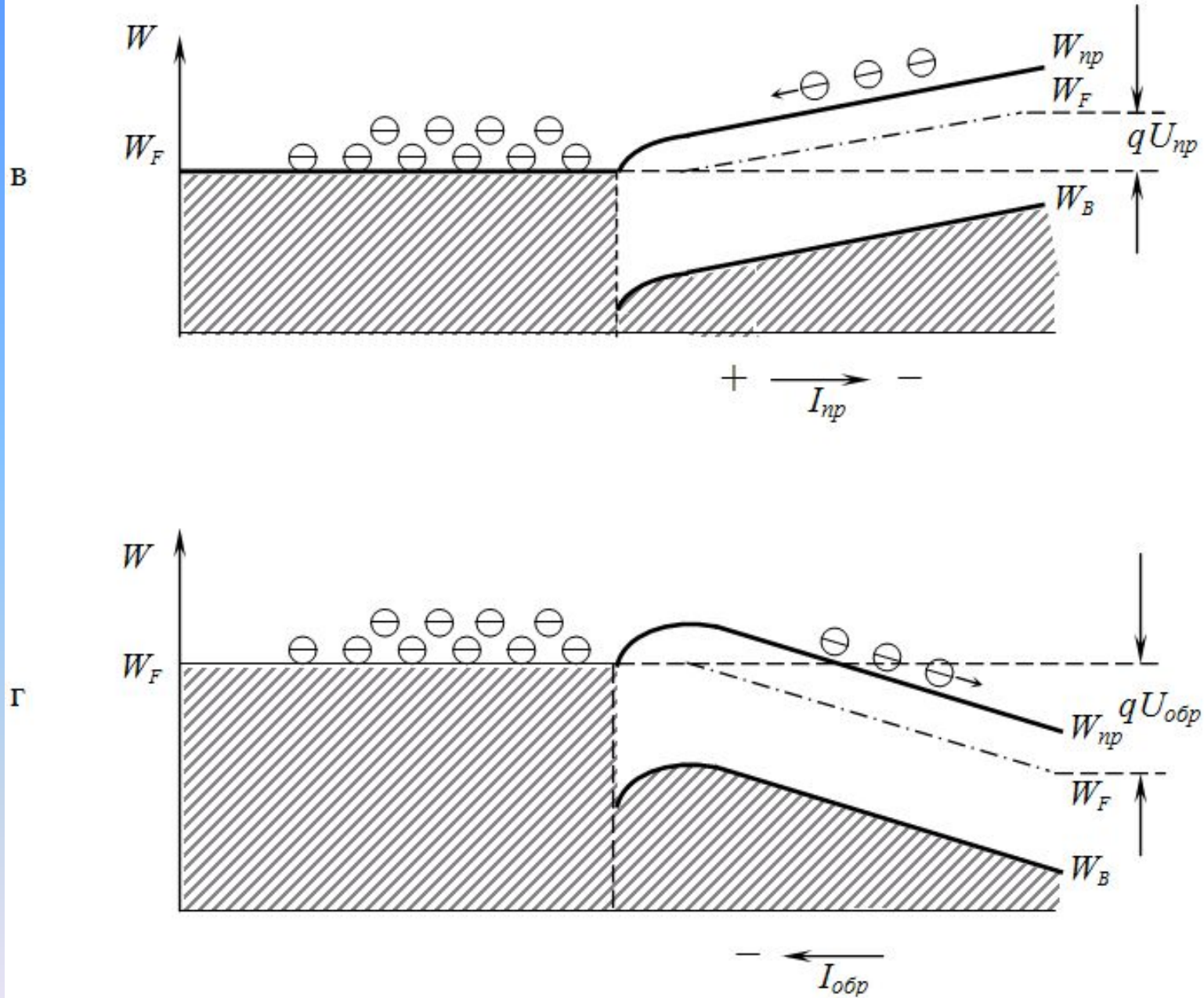


Рис. 17. Контакт металла и  $n$ -полупроводника ( $W_{ом} < W_{оп}$ ): при прямом включении (в); при обратном включении (г)

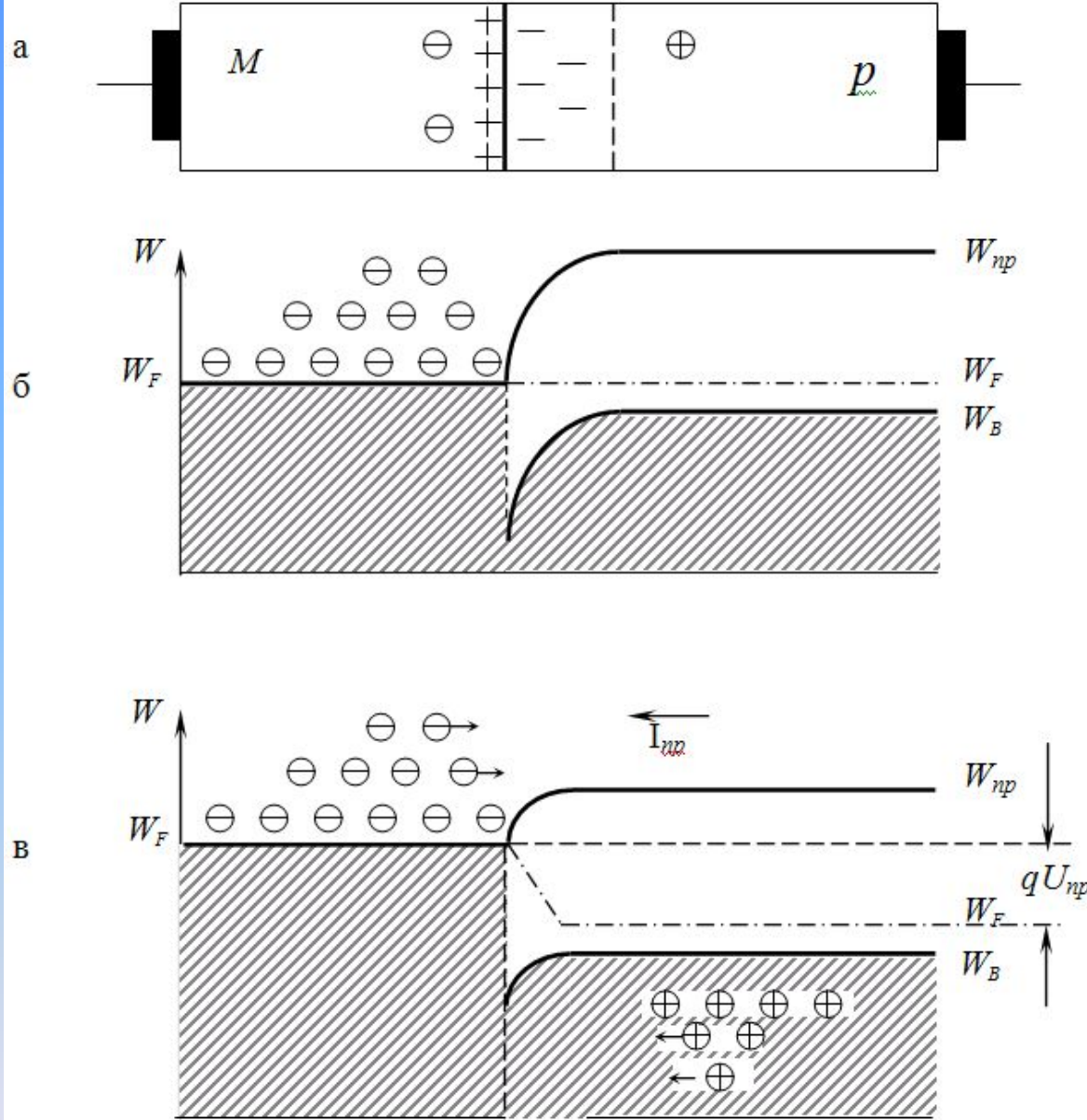


Рис. 18. Контакт металла и  $p$ -полупроводника ( $W_{ом} < W_{ор}$ ):  
схематическое изображение перехода (а); зонные диаграммы для  
равновесного состояния (б); при прямом включении (в)

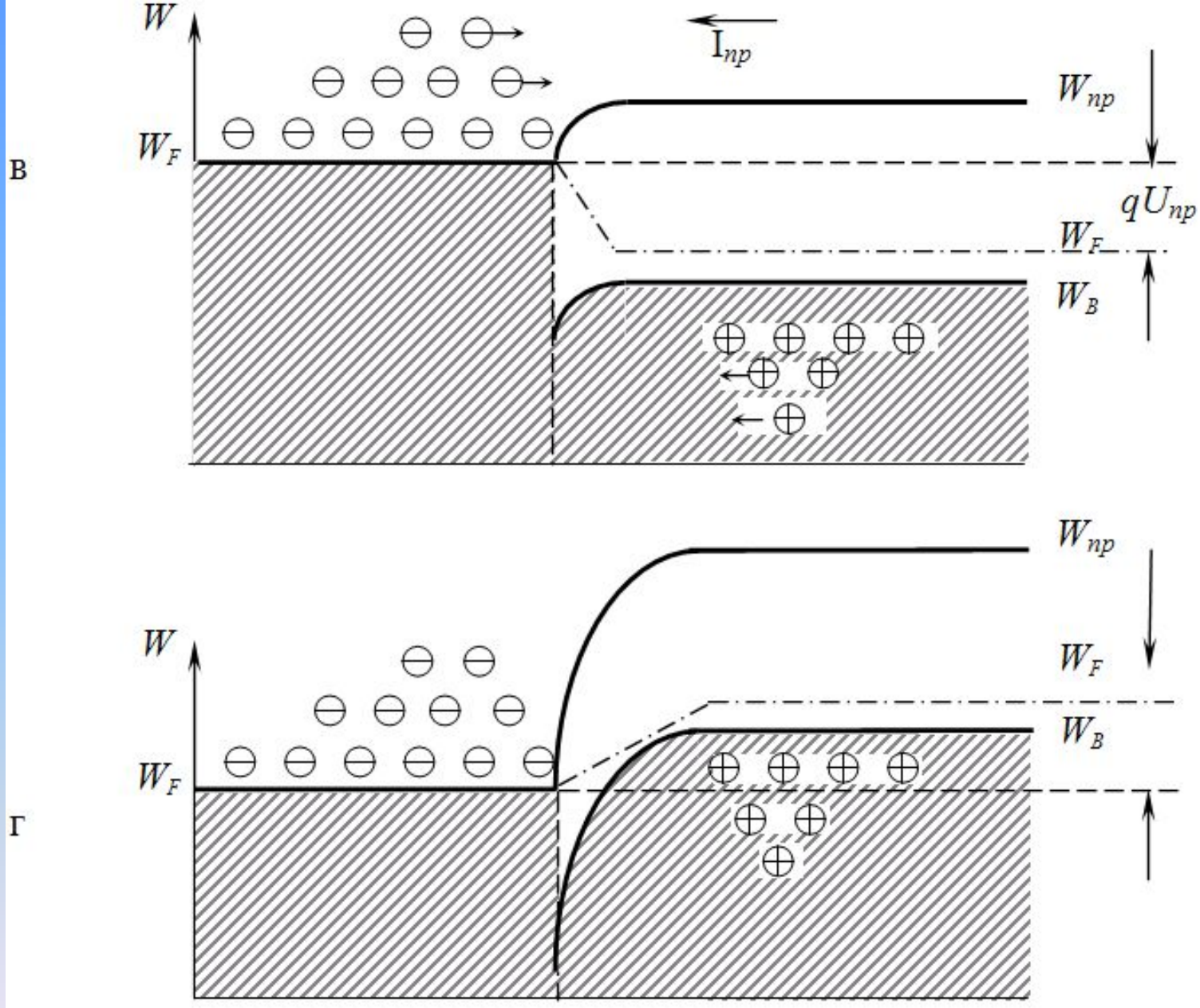


Рис. 18. Контакт металла и  $p$ -полупроводника ( $W_{ом} < W_{ор}$ ): при прямом включении (в); при обратном включении (г)

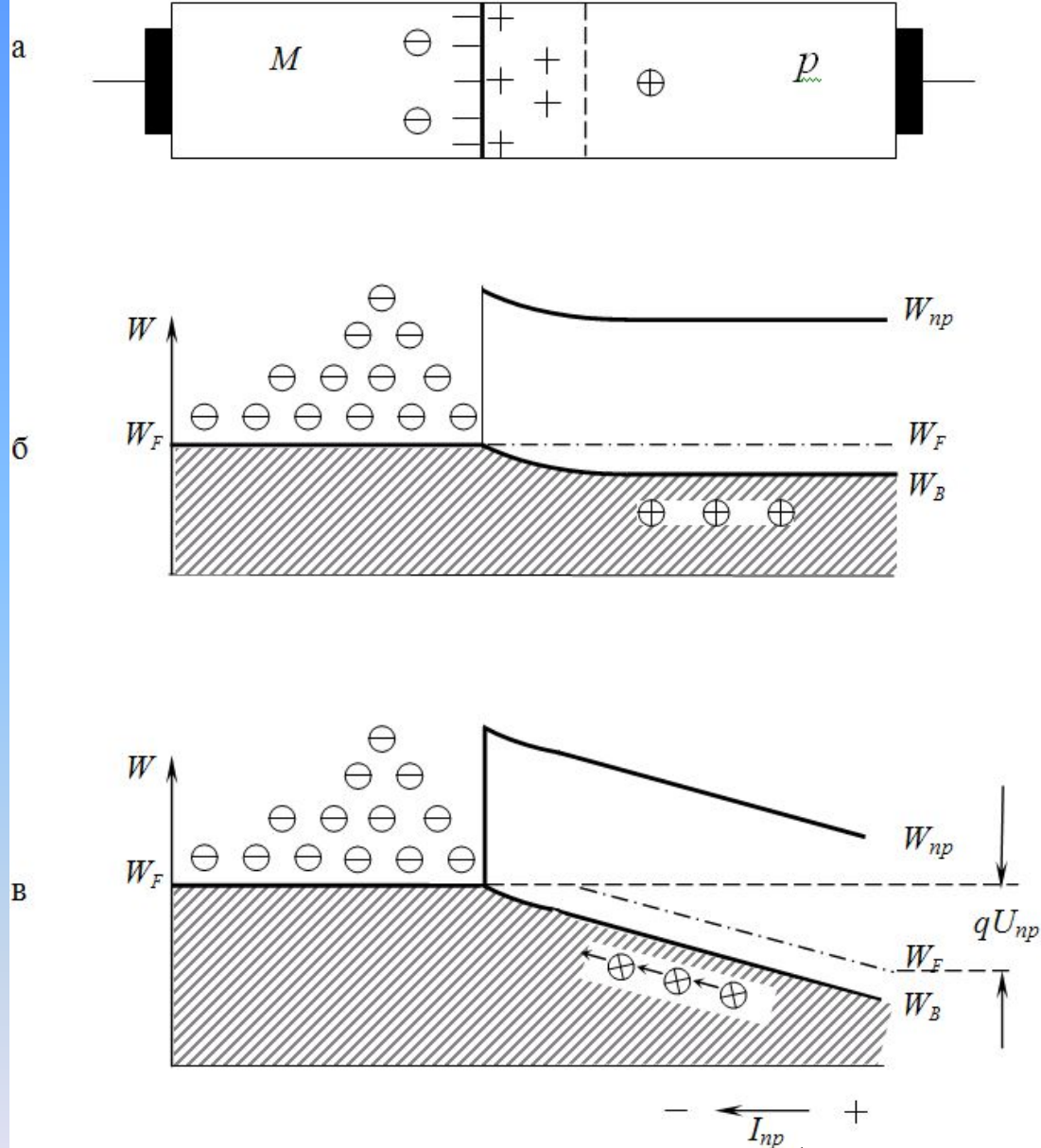


Рис. 19. Контакт металла и  $p$ -полупроводника ( $W_{ом} > W_{ор}$ ):  
схематическое изображение перехода (а); зонные диаграммы для  
равновесного состояния (б); при прямом включении (в)

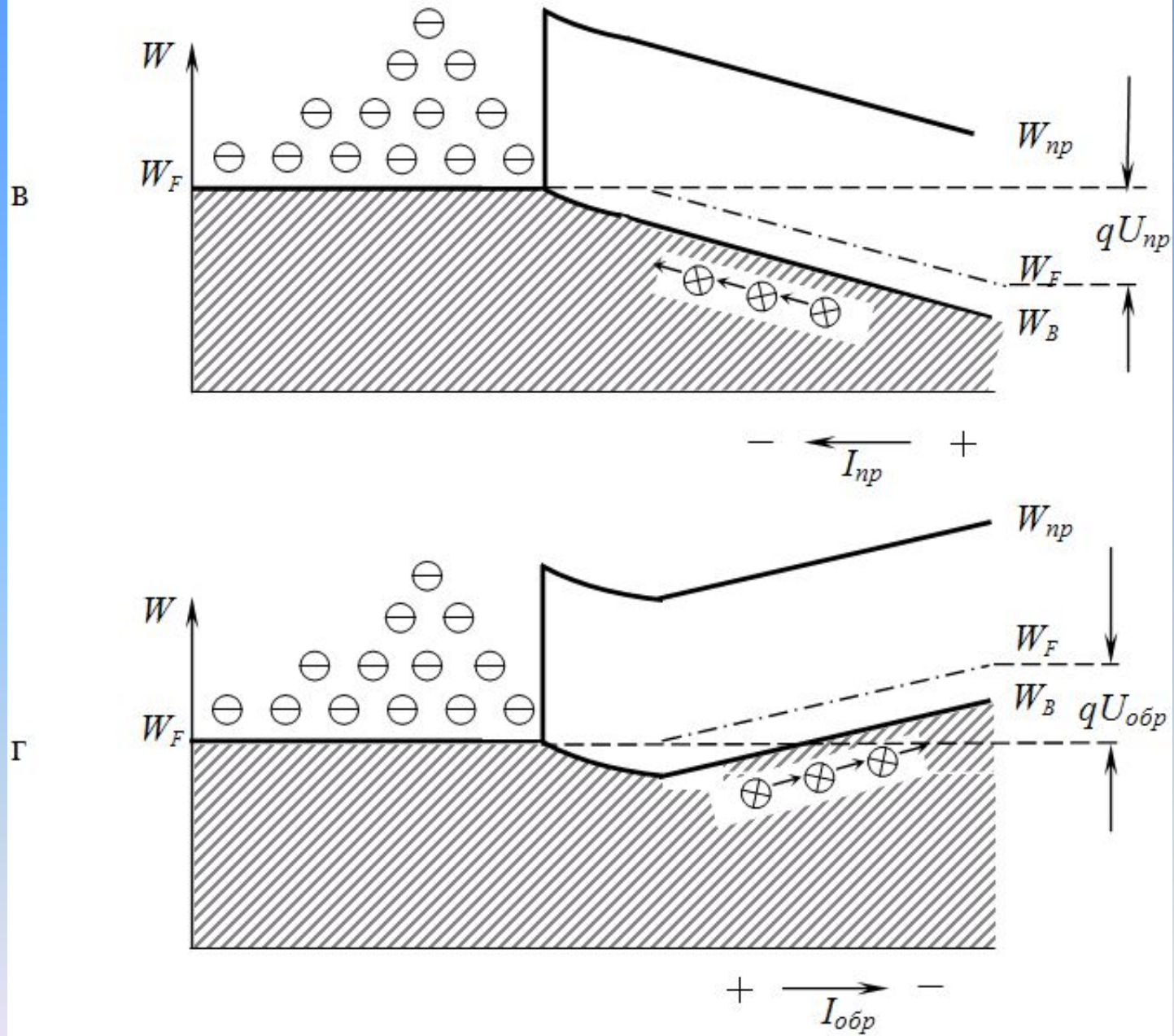


Рис. 19. Контакт металла и  $p$ -полупроводника ( $W_{ом} > W_{ор}$ ): при прямом включении (в); при обратном включении (г)



