

**Решения заданий заключительного этапа  
 по направлению «Электроника и наноэлектроника»**

Задания по направлению состояли только из инвариантной части. Для того, чтобы претендовать на статусы медалиста, дипломанта I, II, III степени, участникам необходимо набрать наибольшее число баллов за все задания.

Номер задания	Максимальный балл	Учёт в рейтинге по направлению
1	5	✓
2	5	✓
3	5	✓
4	15	✓
5	20	✓
6	25	✓
7	25	✓

**Задача 1 (5 баллов)**

В схеме, изображенной на рис.1,  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 50 \text{ Ом}$ ,  $E = 10 \text{ В}$ .  
 Определить показания амперметра.

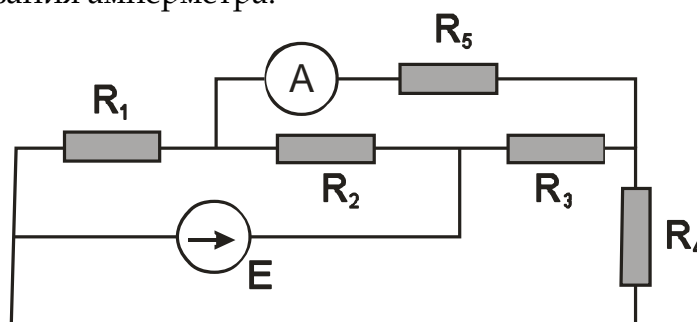


Рис.1

Найти показание амперметра.

**Решение**

Обозначим узлы схемы буквенными символами

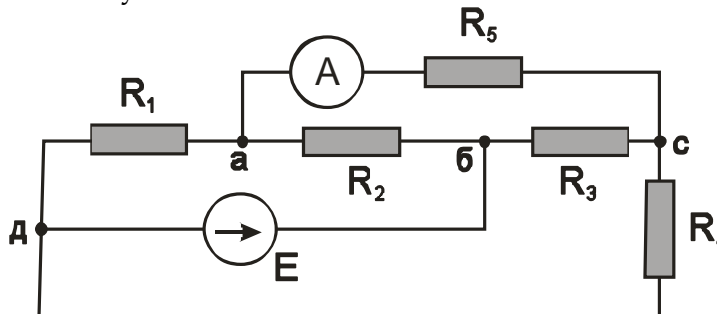


Рис.1-2.

Преобразуем схему к виду:

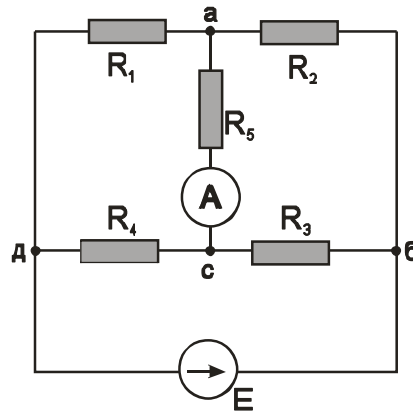
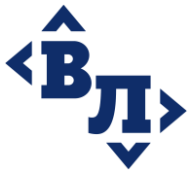


Рис.1-3

Ввиду того, что сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  равны друг другу, потенциалы точек  $a$  и  $c$  одинаковы. Следовательно, ток по цепи ( $a - c$ ) течь не будет. Амперметр покажет 0.

### Задача 2 (5 баллов)

Для схемы, изображенной на рис.2, рассчитать показание вольтметра, учитывая, что  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 80$  Ом,  $E = 10$  В, а вольт-амперная характеристика диода изображена на рисунке.  $V_0 = 1$  В.

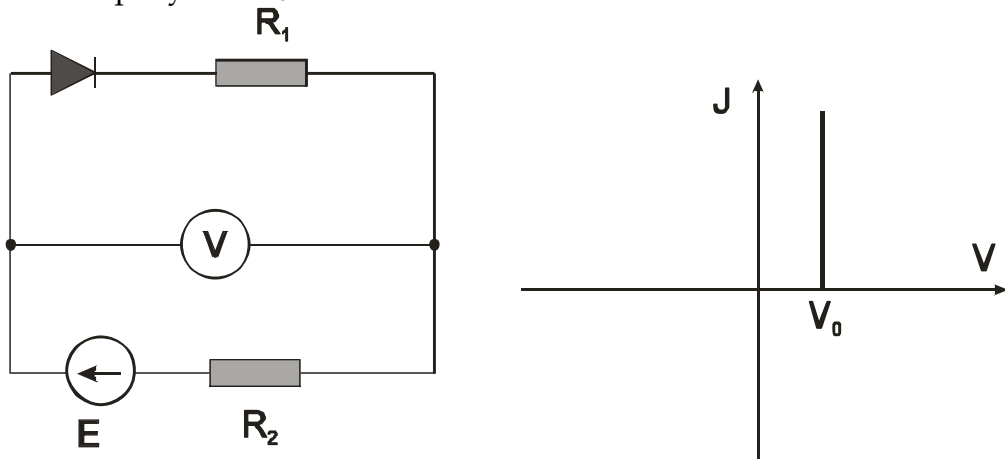


Рис.2.

### Решение

Очевидно, что при  $E < V_0$  ток через диод протекать не будет и соответственно вольтметр покажет напряжение источника питания  $V=E$ . Если  $E > V_0$ , то диод открывается и ток в цепи будет равен

$$J = (E - V_0) / (R_1 + R_2) \quad J = (10 - 1) / (100 + 80) = 0,05 \text{ А.}$$

При этом вольтметр будет показывать напряжение, равное  $V = V_0 + J R_1 = 6$  В

### Задача 3 (5 баллов)

Дано:  $E_1 = 10$  В,  $E_2 = 50$  В, ток источника тока 1 А,  $C = 500$  пФ,  $R = 500$  Ом.

Определить разность потенциалов между точками 3 и 4. Решение объяснить

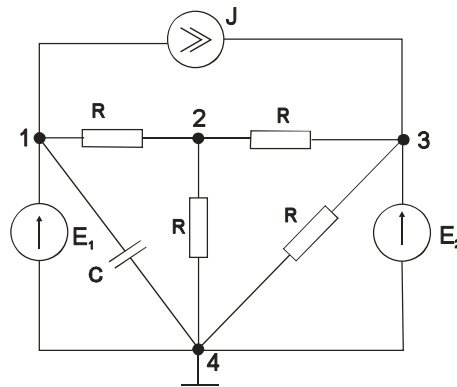


Рис.3

### Решение

Узлы схемы 3 и 4 подсоединены непосредственно к полюсам батареи  $E_2$ , следовательно, искомая разность потенциалов будет равна ЭДС батареи  $E_2 = 50$  вольт.

### Задача 4 (15 баллов)

Гипотетический полупроводник с шириной запрещенной зоны  $0,8$  эВ легирован донорной примесью в концентрации  $N_D = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Энергия активации примеси  $0,05$  эВ. При некоторой температуре  $T_1$  уровень Ферми  $E_F$  располагается в запрещенной зоне на расстоянии  $0,05$  эВ ниже дна зоны проводимости  $E_C$ . Концентрация собственных носителей заряда при температуре  $T_1$  равна  $n_i = 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ . На рисунке 4 приведена соответствующая энергетическая диаграмма.

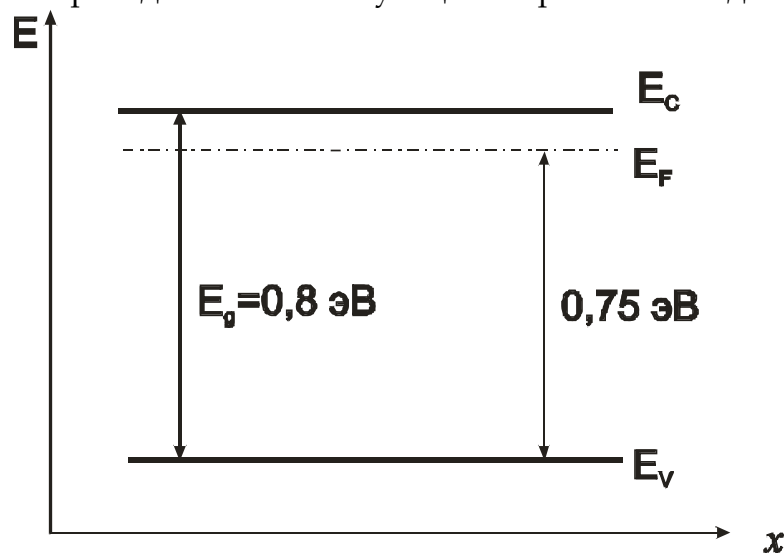


Рис.4. Энергетическая диаграмма полупроводника

Определить равновесные концентрации основных и неосновных носителей заряда при температуре  $T_1$ .

### Решение

Как следует из условия задачи уровень Ферми при заданной температуре совпадает с донорным уровнем. А так как вероятность заполнения состояния с энергией Ферми при любой температуре, отличной от  $0\text{K}$ , равно  $1/2$ , то значит при



заданной температуре донорный уровень будет заполнен на половину. Соответственно равновесная концентрация свободных электронов (в зоне проводимости)  $n_{n0}$  будет равна  $N_D/2 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . По закону действующих масс произведение равновесных концентраций основных и неосновных носителей заряда для любой температуры равно  $n_i^2 = 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-6}$ . Следовательно, равновесная концентрация дырок при температуре  $T_1$  будет  $p_{n0} = n_i^2 / n_{n0} = 12,5 \text{ см}^{-3}$ .  
Ответ:  $n_{n0} = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $p_{n0} = 12,5 \text{ см}^{-3}$ .

### Задача 5 (20 баллов)

На рисунке 5-1 приведена полупроводниковая  $p$ - $i$ - $n$  структура.  $p$ - и  $n$ -области легированы одинаково и однородно,  $i$  - область с собственной проводимостью. Температура структуры соответствует области истощения примеси.

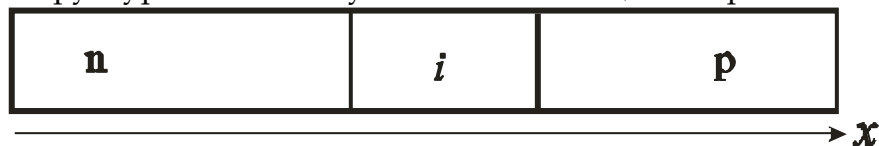


Рис.5-1.

Требуется:

1. Нарисовать графики зависимости от координаты  $x$  плотности объемного заряда  $\rho$  (в приближении объемного заряда) и напряжённости электрического поля  $E$  в этой структуре в равновесном состоянии.
2. На этих же графиках показать, как изменятся эти зависимости при подаче на структуру некоторого обратного смещения (рис.5-2).

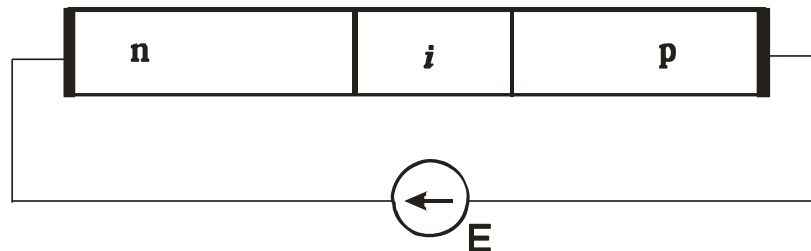


Рис.5-2.

### Решение

1. Равновесное состояние.

Поскольку в  $i$  - области отсутствуют ионы примеси (т.к. область не легирована), то объемные заряды (обеспечивающие контактную разность потенциалов) будут формироваться в  $p$ - и  $n$ -областях на границе с  $i$  - областью. В приближении объемного заряда принимается, что заряды создаются только ионами примеси (положительно заряженными донорами в  $n$ -области и отрицательно заряженными акцепторами в  $p$ -области), т.е. плотность его постоянна и от координаты  $x$  не зависит. Эюра плотности объемного заряда изображена на рис. 5-3а.

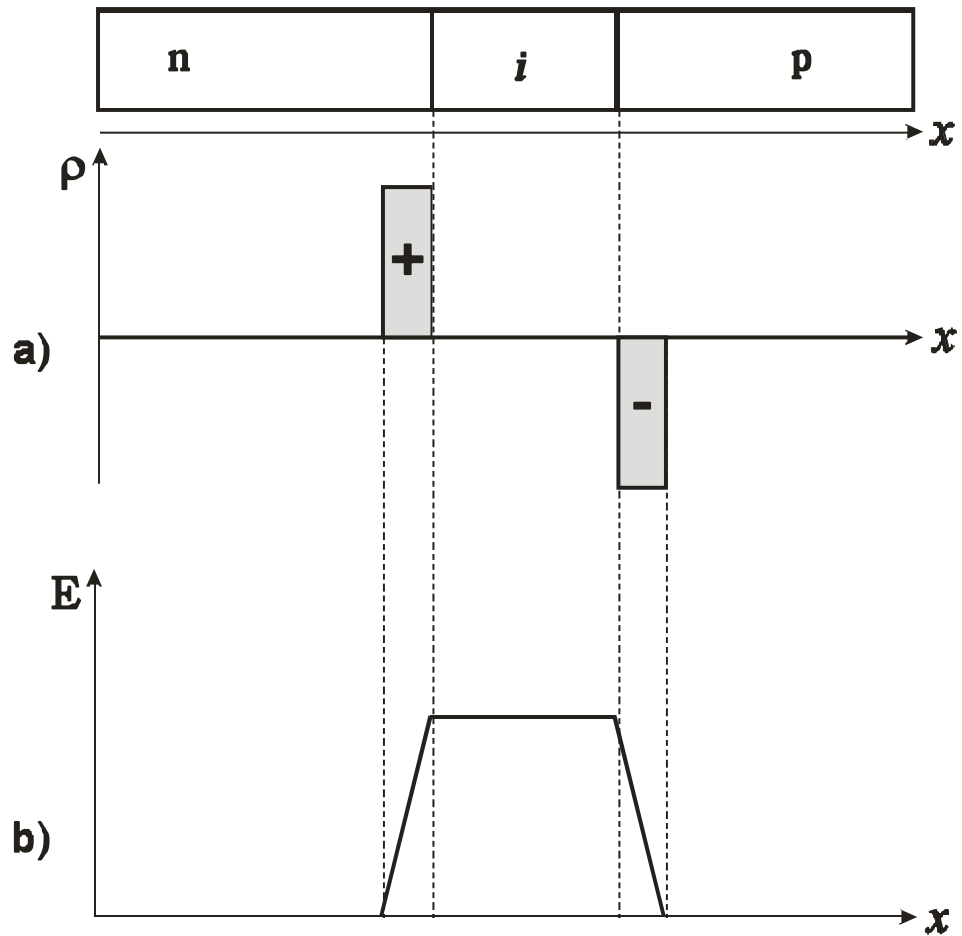


Рис.5-3. Равновесное состояние структуры: а) – эюра плотности объемного заряда, б) – эюра напряженности электрического поля

Поскольку  $\rho(x) = \text{const}$  в пределах объемного заряда, то напряженность электрического поля, создаваемого этими зарядами будет линейной функцией координаты  $x$ . В области собственной проводимости напряженность электрического поля будет оставаться постоянной. Эюра напряженности поля изображена на рис. 5-3б.



## 2. Обратное смещение.

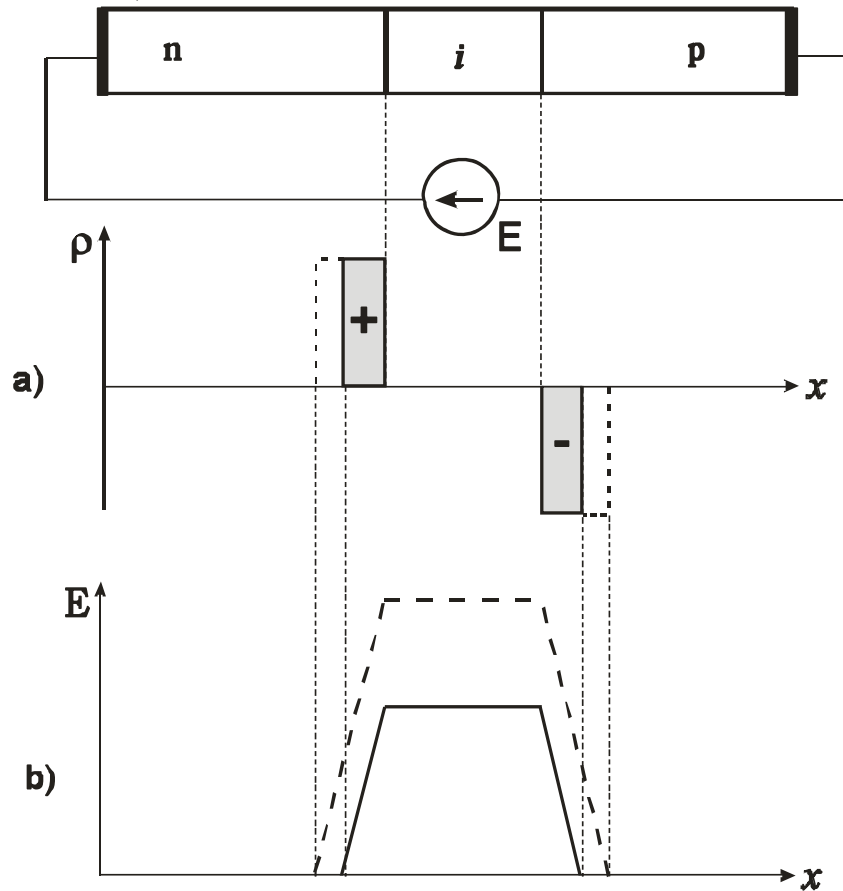


Рис.5-4. Пунктиром показано влияние обратного смещения на эшоры плотности объемного заряда (а) и напряженности электрического поля (б)

При подаче обратного смещения толщины объемных зарядов увеличатся (пунктирная линия на рис. 5-4а), а т.к. плотность заряда останется прежней, то углы наклона зависимостей  $E(x)$  в  $p$ - и  $n$ -областях останутся прежними (пунктирные линии на рис. 5-4 б).

### Задача 6 (25 баллов)

Имеется ступенчатый  $p^+$ - $n$ -переход (рис.6-1). Требуется нарисовать стилизованные энергетические диаграммы для этого перехода без учета базового сопротивления для трех случаев: равновесное состояние, прямое смещение, обратное смещение. Отдельно показать (графически) как изменятся эти диаграммы с учетом базового сопротивления

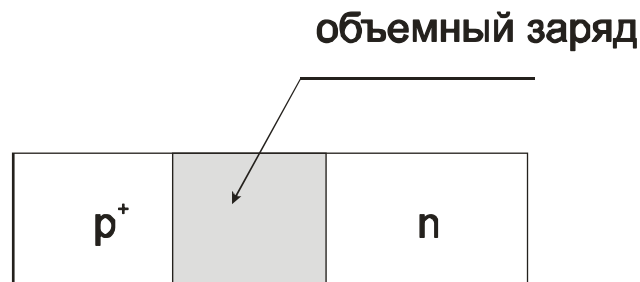


Рис. 6-1. Исследуемая структура



### Решение

Поскольку р-п-переход сильно несимметричен, то и в равновесном состоянии толщины положительного и отрицательного объемного зарядов будут существенно различны, как это показано на рис 6-2 а). При подаче прямого смещения объемный заряд сокращается, как показано на рис. 6-2 б). При обратном смещении объемный заряд расширяется (см. рис.6-2 с)).

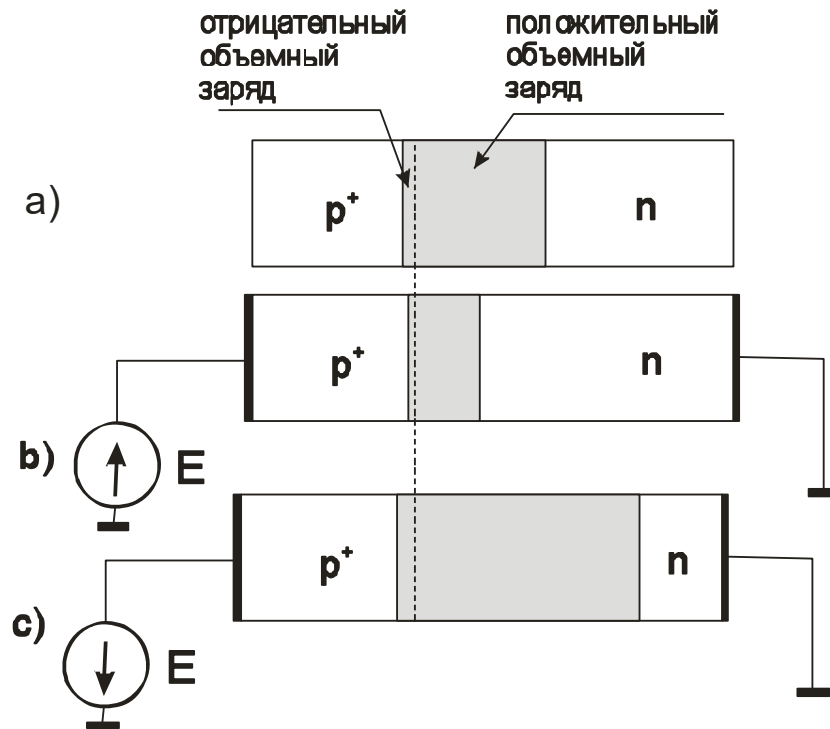


Рис. 6-2. Качественная картина изменения объемного заряда в рассматриваемом переходе при подаче прямого а) и обратного б) смещения

На рис.6-3 приведена стилизованная равновесная энергетическая диаграмма структуры.

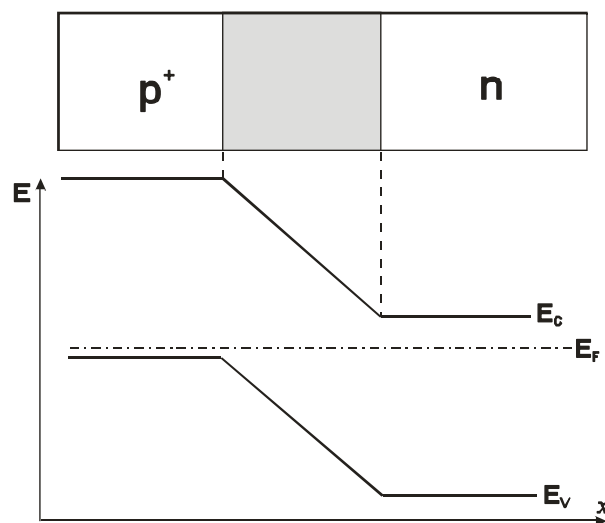


Рис.6-3. Равновесная энергетическая диаграмма структуры



На рис.6-4 приведена энергетическая диаграмма для прямого смещения этого перехода.

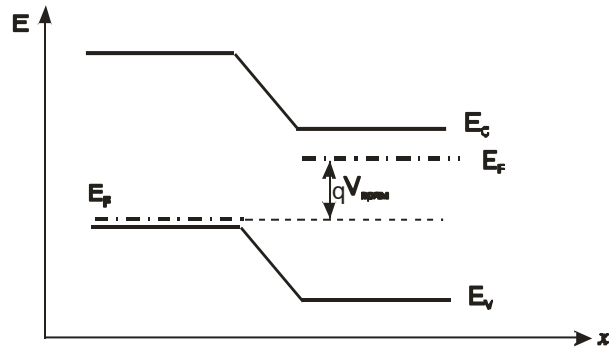


Рис.6-4.

На рис.6-5 приведена энергетическая диаграмма для обратного смещения этого перехода.

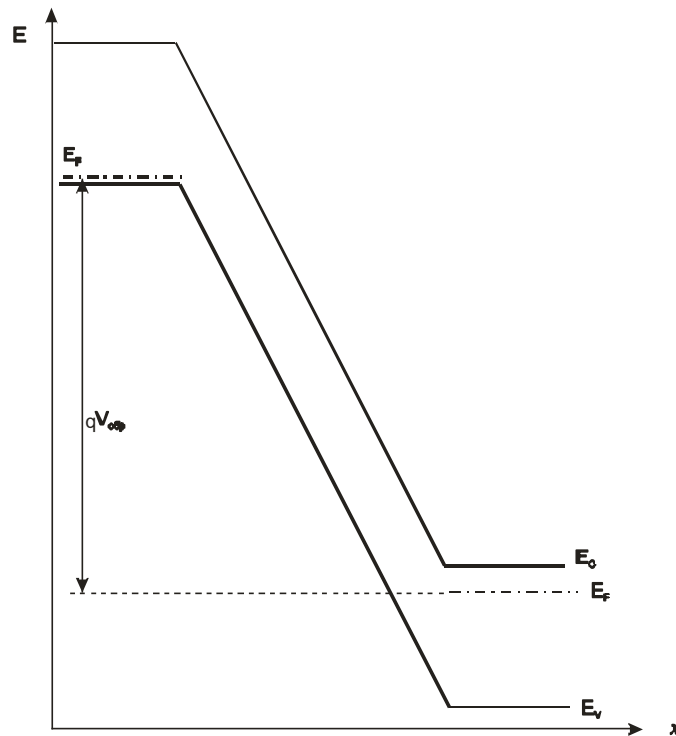


Рис.6-5.

Поскольку при прямом смещении через структуру может протекать большой ток, то необходимо учитывать падение потенциала кроме объемного заряда и на базовой области перехода (в нашем случае на *n*-области). С учетом этого эффекта энергетическая диаграмма примет вид, изображенный на рис.6-6.



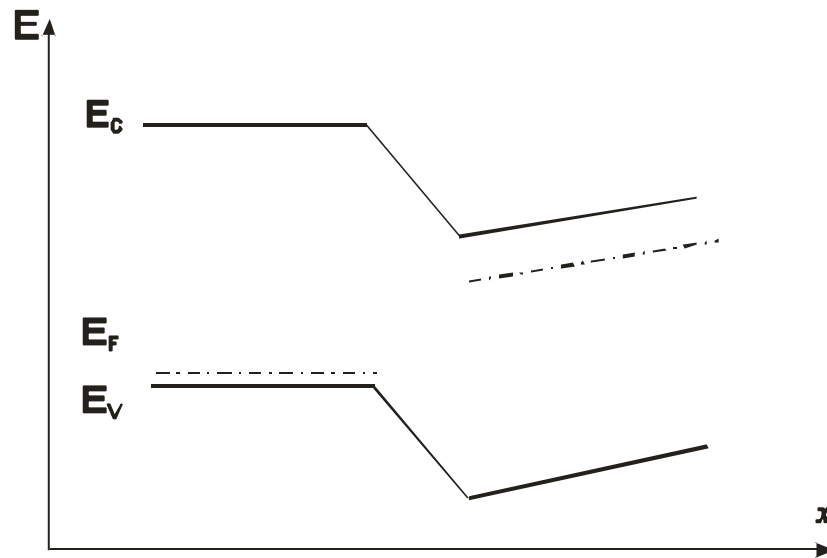


Рис.6-6.

На диаграммы для равновесного состояния и для обратного смещения сопротивление базы не влияет.

### Задача 7 (25 баллов)

На рис. 7-1 приведена условная конструкция и схема включения бездрейфового биполярного транзистора.

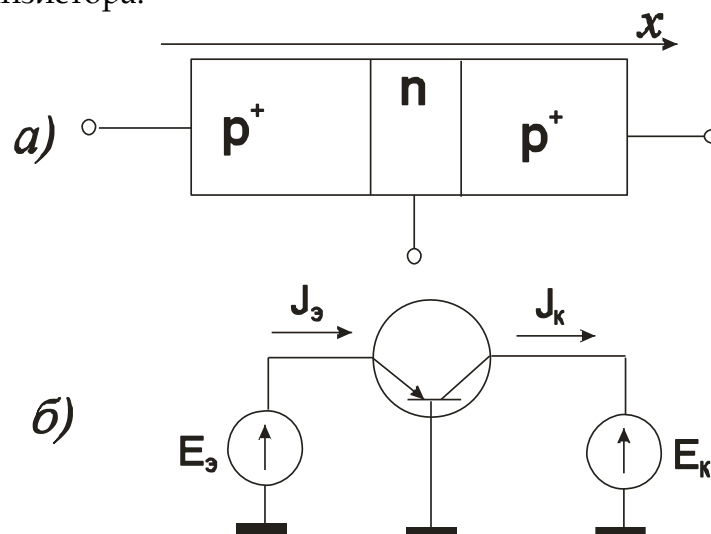
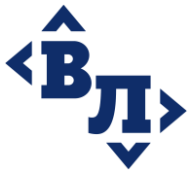


Рис.7-1. Условная конструкция биполярного бездрейфового транзистора (а) и схема, обеспечивающая активный режим работы транзистор (б).

Для упрощения задачи считать все три области однородно легированными. Концентрации типозадающей примеси в р-областях структуры одинаковыми и втрое больше концентрации доноров в базовой области структуры. Так же следует считать, что коэффициент переноса дырок через базу транзистора равен единице. Т.е.  $J_{p3} / J_{pk} = 1$  ( $J_{p3}$  -дырочная компонента тока эмиттера,  $J_{pk}$  -дырочная компонента тока коллектора).



При данных условиях коэффициент передачи тока эмиттера можно принять за 1. Дырки через базу переносятся исключительно за счет диффузии, т.е. ток коллектора определяется градиентом концентрации дырок в базе транзистора. Для заданной структуры и заданных параметров схемы на рис.7-2 приведено (в первом приближении) распределение концентрации дырок в активной базе по координате  $x$  (см. рис.7-1).

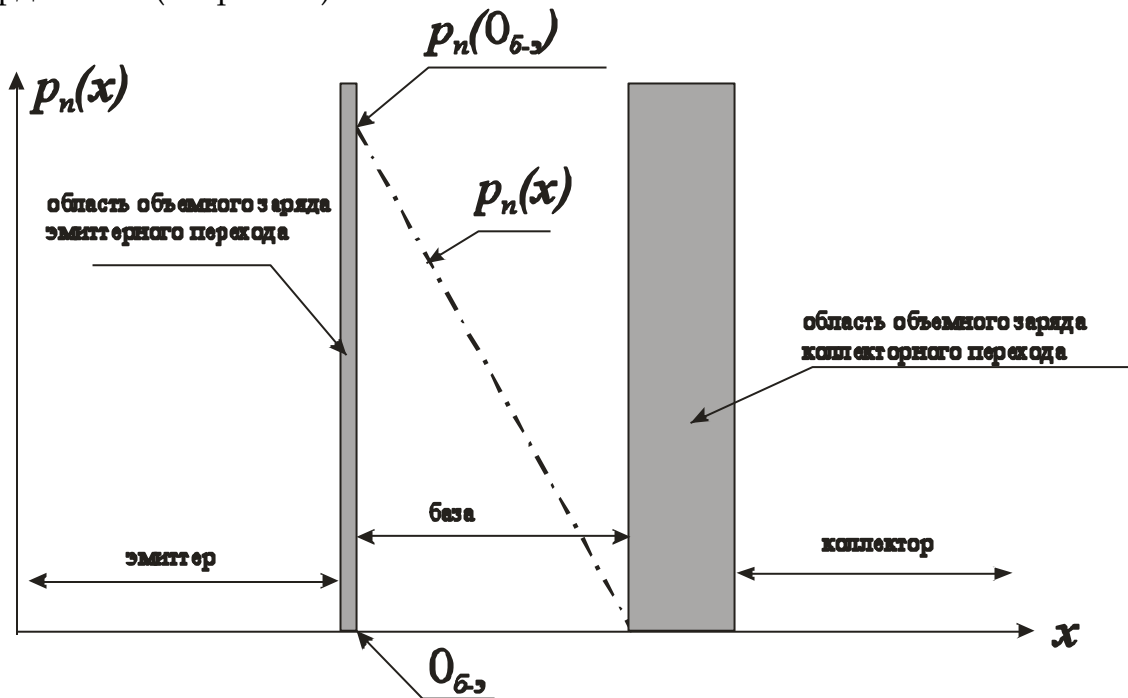


Рис. 7-2

- Нарисовать распределение по координате  $x$  концентрации неосновных носителей заряда во всех трех областях транзистора для равновесного состояния (т.е. в отсутствии источников питания).
- Нарисовать (по сравнению с рис.7-2) как изменится распределение дырок в базе если концентрацию типозадающей примеси в базовой области транзистора уменьшить вдвое при неизменных всех остальных параметрах конструкции транзистора и схемы включения.
- Определить, как при этом изменится ток коллектора

### Решение

1. В равновесном состоянии структуры, т.е. в отсутствии источников питания во входной и выходной цепи, картина распределение равновесной концентрации неосновных носителей заряда (с учетом количественного соотношения примесей) по координате имеет вид, изображенный на рис. 7-3.

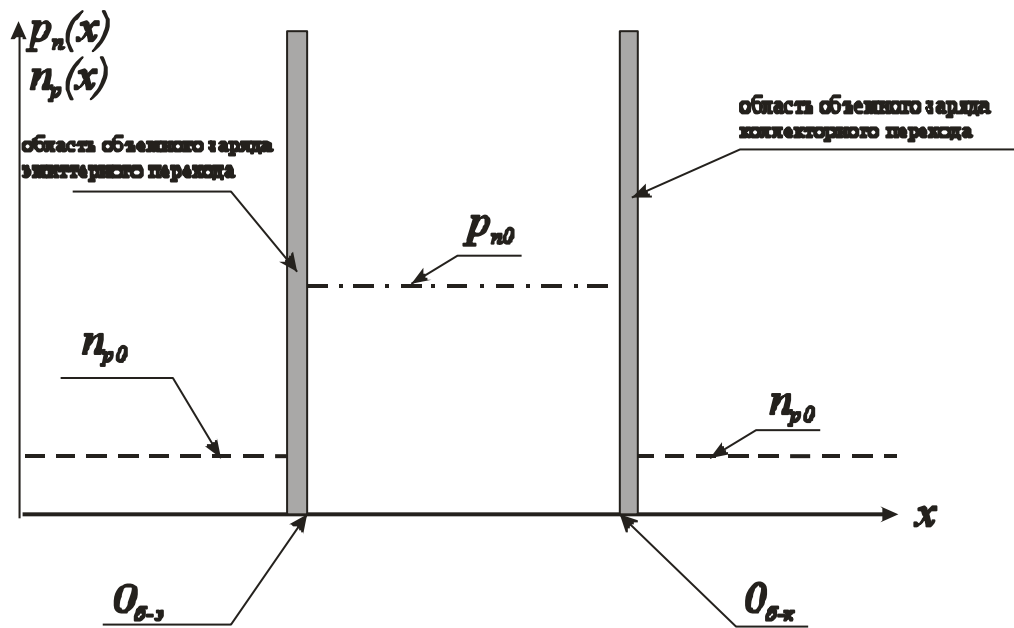


Рис.7-3. Распределение по координате неосновных носителей заряда во всех областях транзистора в равновесном состоянии

Как известно концентрация неосновных носителей заряда на границе с объемным зарядом эмиттерного перехода определяется соотношением

$$p_n(0_{б-э}) = p_{n0} \cdot \exp(+qV_{б-э} / kT), \text{ это уравнение инжекции}$$

а на границе с объемным зарядом коллекторного перехода соотношением

$$p_n(0_{б-к}) = p_{n0} \cdot \exp(-qV_{б-к} / kT) \sim 0, \text{ это уравнение экстракции}$$

Согласно уравнению экстракции, концентрация дырок на границе с объемным зарядом коллекторного перехода практически обращается в ноль при любом коллекторном напряжении большем 0,25 В.

С учетом граничных условий распределение дырок в базе выглядит как показано на рис.7-2.

Если концентрацию донорной примеси в базе транзистора уменьшить вдвое при неизменных параметрах цепи, то

- согласно закону действующих масс вдвое увеличится равновесная концентрация дырок в базе и, соответственно, вдвое увеличится концентрация дырок в базе на границе с эмиттерным переходом
- увеличится толщина слоя объемного заряда коллекторного перехода за счет базы (т.е. граница активной базы со стороны коллектора сдвинется в сторону эмиттера), т.е. база станет тоньше.

С учетом этого распределение дырок в базе изменится, как показано на рис.7-4.

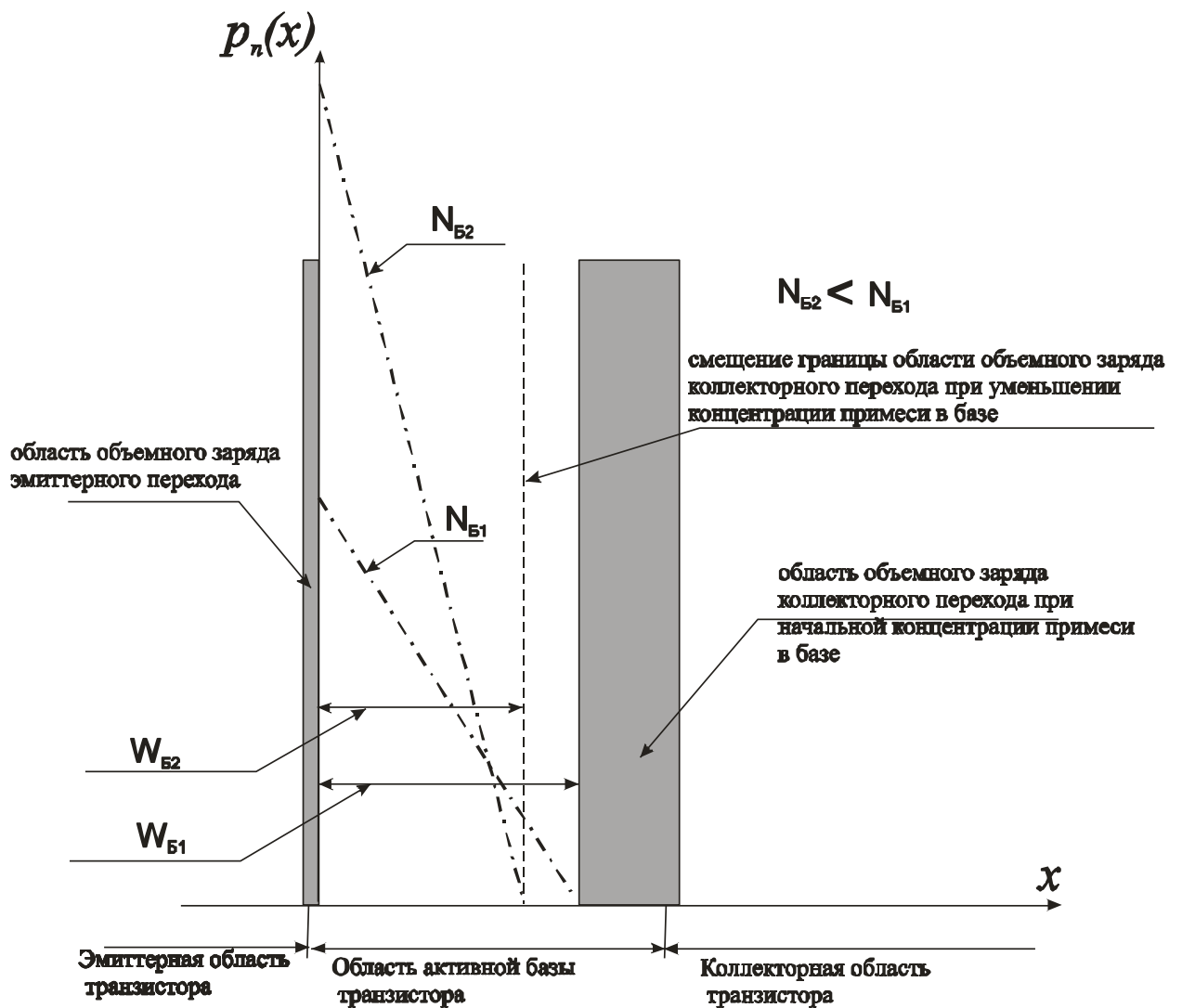


Рис.7-4. Распределение дырок (неосновных носителей заряда) в базовой области транзисторной структуры, включенной по схеме изображенной на рис. 7-1б для двух значений концентрации примеси в базовой области транзистора.

Что касается тока коллектора, то поскольку градиент распределения дырок в базе увеличится немногим более чем в два раза, то на столько же возрастет и ток коллектора.