

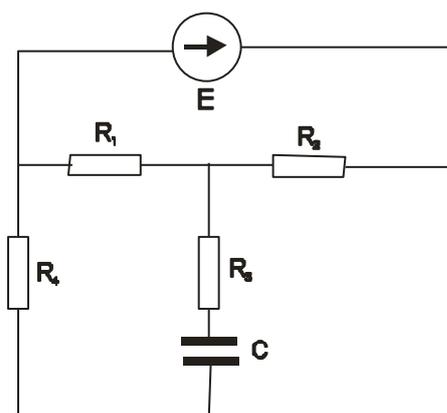
Профиль: «Электроника и наноэлектроника»

КОД – 070

Время выполнения задания – 240 мин.

Задача 1 (5 баллов)

Дано: $E = 100 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100 \text{ Ом}$, $C = 200 \text{ пФ}$



Определить величину заряда на обкладках конденсатора.

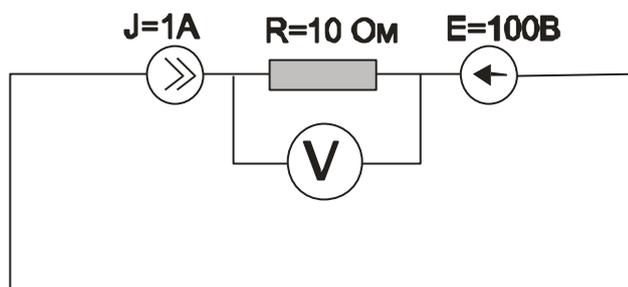
Решение.

Поскольку постоянный ток через емкость не идет, то напряжение на конденсаторе равно напряжению на сопротивлении R_2 , которое ввиду равенства $R_1 = R_2$ составляет 50 В.

Тогда искомый заряд

$$Q = C \cdot V_C = 200 \cdot 10^{-12} \cdot 50 = 10^{-8} \text{ Кл}$$

Задача 2 (10 баллов)



Для данной схемы, содержащей идеальные источники напряжения и тока, определить показания вольтметра.

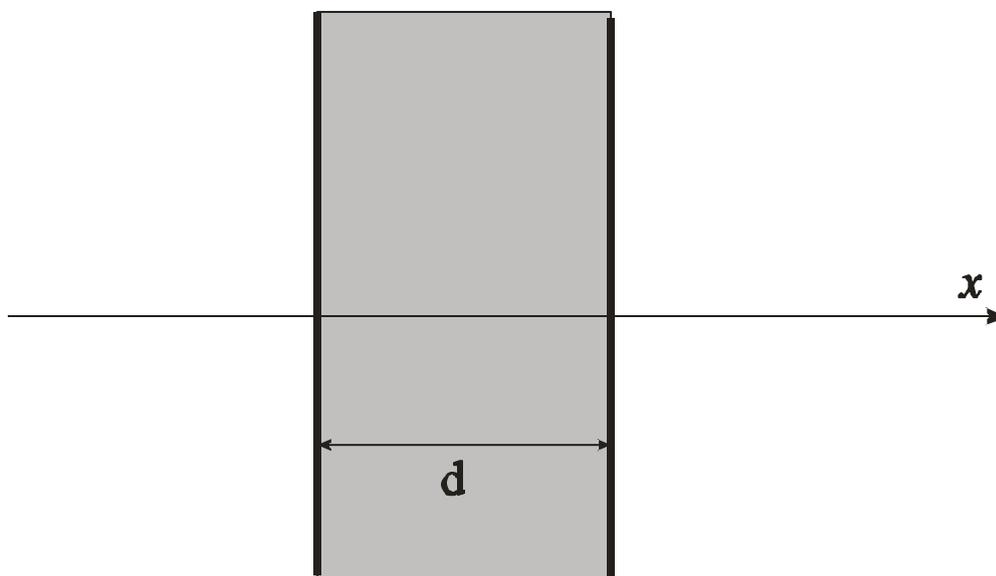
Решение.

Поскольку внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, а внутреннее сопротивление идеального источника тока – бесконечность, то в указанной цепи будет протекать ток 1 ампер и источник напряжения к этому ничего добавить не может. Соответственно вольтметр покажет 10 вольт.

Задача 3 (10 баллов)

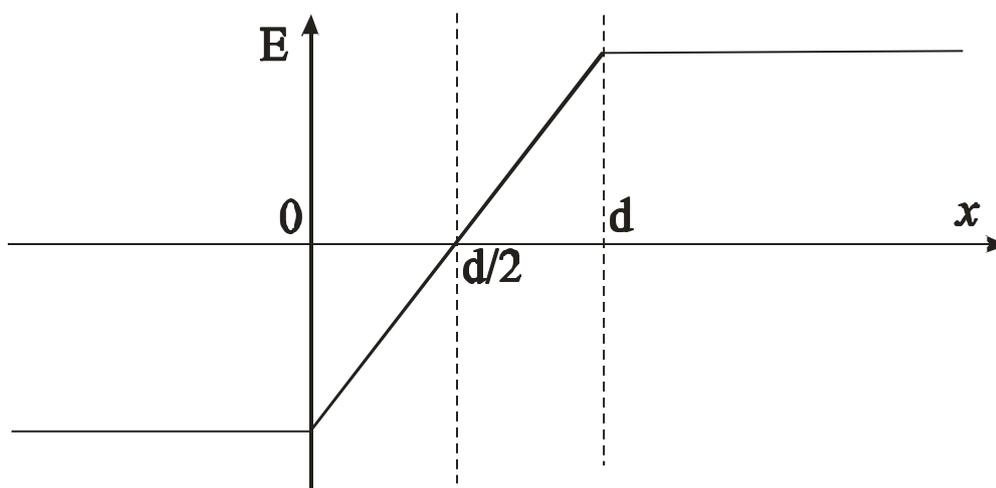
Пространство между двумя бесконечными плоскостями однородно заполнено положительно заряженными частицами (фрагмент части этой системы приведен на рис.).

Нарисовать качественную зависимость напряженности электрического поля в такой системе от координаты x .

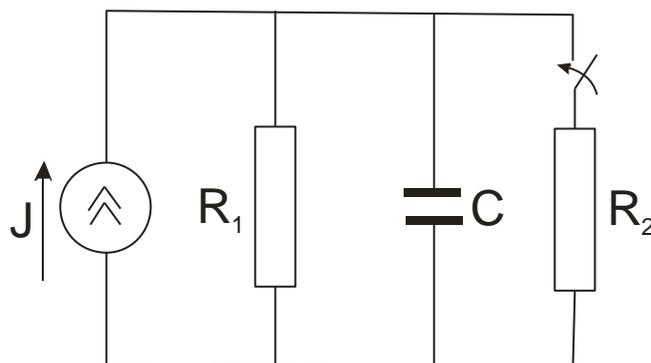


Решение.

Очевидно, что вне слоя поле будет таким же, как поле заряженной плоскости, т.е. не зависеть от координаты. На оси симметрии поле очевидно равно нулю. Таким образом, искомая зависимость $E(x)$ будет иметь вид, изображенный на рисунке.



Задача 4 (10 баллов)



Дано: Ток источника тока $J = 10 \text{ A}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $C = 200 \text{ пФ}$

- Определить значения токов в ветвях и напряжение на емкости до момента коммутации.
- Определить значения токов в ветвях и напряжение на емкости в первый момент после коммутации.
- Определить установившиеся значения токов в ветвях и напряжения на емкости после коммутации.
- Нарисовать качественную зависимость напряжения на емкости и тока через емкость от времени.

Решение.

- До коммутации
 $J_1 = 10 \text{ A}$; $J_C = 0 \text{ A}$; $J_2 = 0$; $V_C = J_1 * R_1 = 100 \text{ В}$

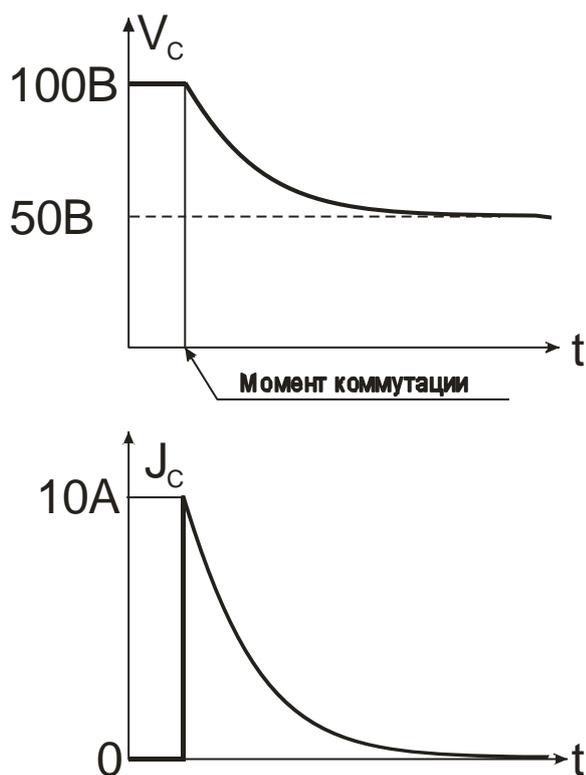
- В первый момент после коммутации сопротивление емкости равно 0, соответственно весь ток источника пойдет через емкость:

$$J_C = 10 \text{ A}; \quad J_1 = 0 \text{ A}; \quad J_2 = 0;$$

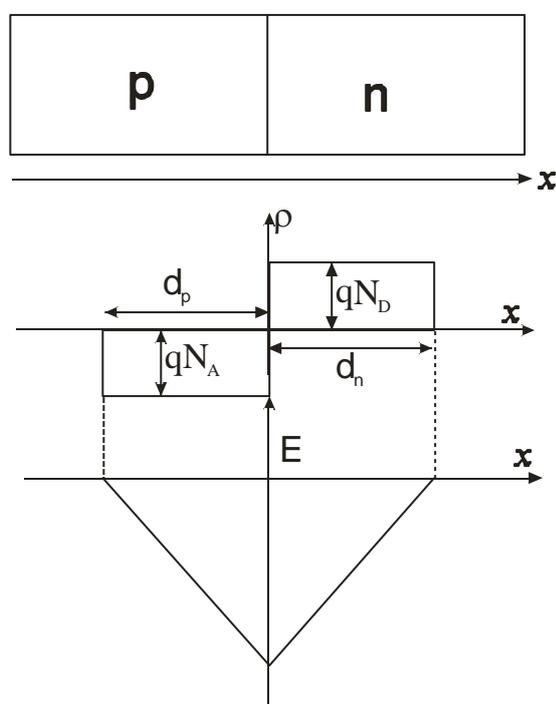
Напряжение на емкости в первый момент после коммутации не меняется $V_C = 100 \text{ В}$.

- Установившиеся значения токов в ветвях и напряжения на емкости после коммутации:
 $J_1 = J_2 = 5,0 \text{ A}$; $J_C = 0 \text{ A}$; $V_C = 50 \text{ В}$.

- Зависимости напряжения на емкости и тока через емкость от времени будут иметь вид:



Задача 5 (20 баллов)



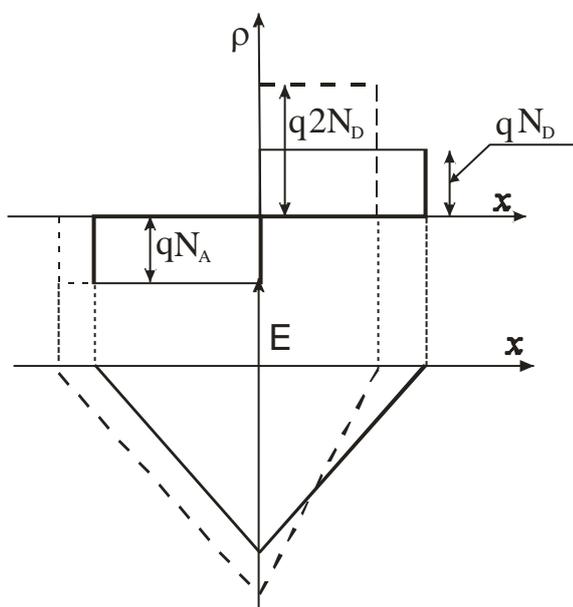
Имеется симметричный ступенчатый p - n -переход. На рисунке приведено условное изображение этого перехода и изображены зависимости плотности объемного заряда и напряженности электрического поля (в приближении объемного заряда) от координаты x .

Необходимо проанализировать (и показать на графике) как изменятся эти зависимости при увеличении концентрации доноров в n -области в 2 раза, а концентрация акцепторов в p -области остается неизменной.

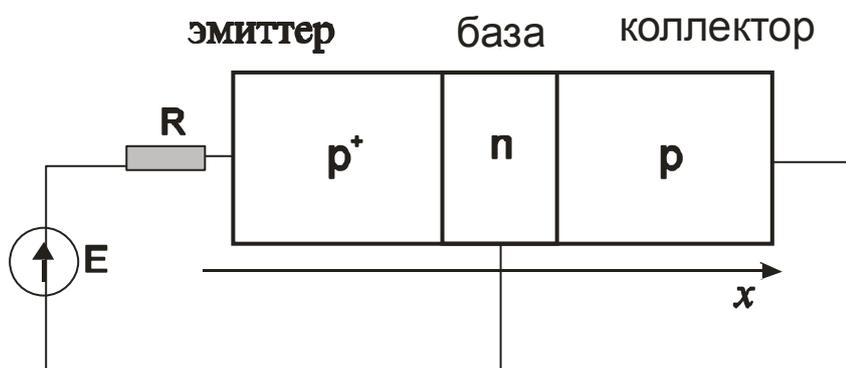
Решение.

Поскольку объемный заряд определяется ионизированными донорами в n -области и ионизированными акцепторами в p -области, то толщины объемных зарядов как в n - так и в p -области изначально одинаковы. И толщина слоя объемного заряда в каждой области структуры в первом приближении обратно пропорциональна квадратному корню из концентрации примеси. Следовательно, при увеличении концентрации доноров плотность объемного заряда в n -области увеличится в 2 раза, а толщина уменьшится примерно в $\sqrt{2}$ раз. Следовательно, полный положительный заряд в n -области вырастет меньше чем в 2 раза. Соответственно отрицательный заряд в p -области так же вырастет в такое же число раз (за счет увеличения толщины).

Зависимость $E(x)$ измениться как показано на рисунке. Угловые зависимости $E(x)$ пропорциональны концентрации примеси в соответствующей области. Соответственно в n -области угловой коэффициент увеличивается в 2 раза, а в p -области - останется без изменения.

**Задача 6 (20 баллов)**

На рисунке приведена схема включения бездрейфового транзистора. Базовая область в таком транзисторе однородно легирована.



Нарисовать качественную зависимость концентрации неосновных носителей заряда в базовой области транзистора от координаты x . На этом же рисунке изобразить пунктиром

зависимость равновесной концентрации неосновных носителей заряда в базе от координаты x .

Ответ подробно аргументировать.

Решение.

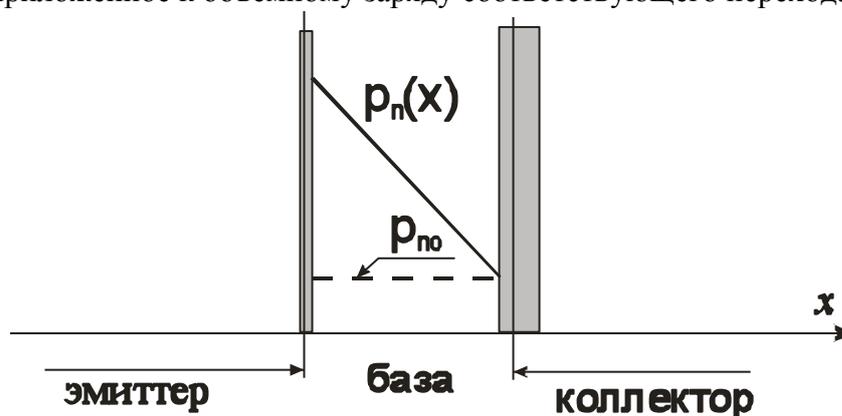
Как следует из схемы включения, эмиттерный переход транзистора находится под прямым смещением, а коллекторный переход находится в равновесном состоянии.

Из теории p - n -перехода известно, что стационарная концентрация неосновных носителей заряда на любой границе слоя объемного заряда эмиттерного или коллекторного p - n -перехода (координата которой принимается за 0) определяется соотношением:

$$p_n(0) = p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{qV_{p-n}}{kT}\right),$$

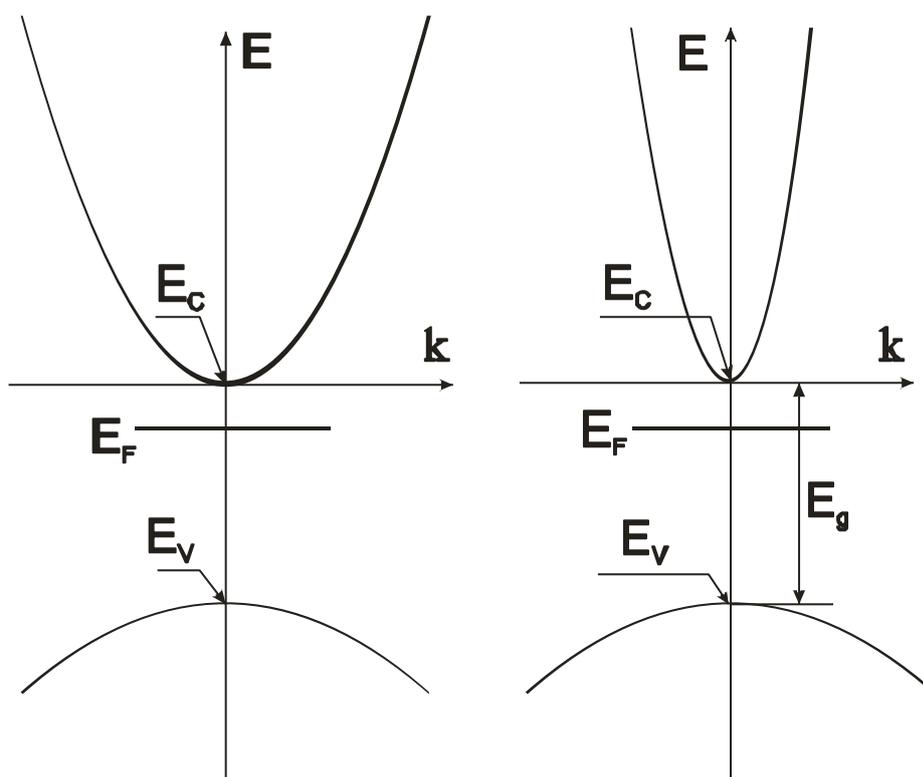
где q – заряд электрона, T – абсолютная температура, k – постоянная

Больцмана, p_{n0} – равновесная концентрация неосновных носителей заряда в базе, V_{p-n} – напряжение, приложенное к объемному заряду соответствующего перехода.



Как видно из схемы включения, эмиттерный переход транзистора включен в прямом направлении, а коллекторный переход находится в равновесном состоянии. Соответственно, концентрация дырок на границе слоя объемного заряда эмиттерного перехода со стороны базы больше равновесной, а на границе слоя объемного заряда коллекторного перехода – равна равновесной. В виду того, что толщина активной базы транзистора много меньше диффузионной длины, зависимость концентрации дырок от координаты в первом приближении можно аппроксимировать линейной зависимостью, как изображено на рисунке (сплошная линия).

Задача 7 (25 баллов)



На рисунке изображены дисперсионные зависимости – зависимости полной энергии электрона E от волнового вектора k для зоны проводимости и валентной зоны для двух гипотетических полупроводников. В обоих полупроводниках одинаковое значение ширины запрещенной зоны и энергии Ферми.

Необходимо определить:

- Тип проводимости полупроводников
- В каком полупроводнике больше подвижность основных носителей заряда
- В каком полупроводнике больше подвижность неосновных носителей заряда
- В каком полупроводнике больше концентрация основных носителей заряда
- В каком полупроводнике больше концентрация неосновных носителей заряда

Ответы обосновать.

Решение.

- Положение энергии Ферми (вблизи зоны проводимости) указывает на электронную проводимость обоих полупроводников.
- Поскольку экстремумы зависимостей $E(k)$ в зоне проводимости и в валентной зоне находятся в центре зоны Бриллюэна (при $k=0$), то эффективная масса проводимости и эффективная масса плотности состояний совпадают.
- Концентрация основных носителей заряда (электронов) определяется расстоянием энергии Ферми от дна зоны проводимости E_C и эффективной плотностью

состояний в зоне проводимости $N_C = \frac{2(2\pi \cdot m_n \cdot kT)^{3/2}}{h^3}$, где m_n – эффективная масса

плотности состояний. Поскольку экстремумы зависимостей $E(k)$ в зоне проводимости и в валентной зоне находятся в центре зоны Бриллюэна (при $k=0$), то эффективная масса проводимости и эффективная масса плотности состояний совпадают как для электронов, так и для дырок.

- Сама же эффективная масса обратно пропорциональна кривизне зависимости $E(k)$.

Как видно из приведенной зависимости $E(k)$, кривизна $\frac{d^2 E}{dk^2}$ у потолка валентной

зоны в обоих полупроводниках одинакова и, следовательно, эффективная масса дырок одинакова. В зоне же проводимости кривизна зависимости $E(k)$ во втором полупроводнике существенно больше, чем в первом полупроводнике, а значит эффективная масса электронов во втором полупроводнике меньше, чем в первом.

- Если E_C принять за ноль отсчета энергии, то $n_{n0} = N_C \cdot \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) = N_D$ – концентрации доноров. Поскольку эффективная плотность состояний в первом полупроводнике больше (из-за большей эффективной массы), то и концентрация электронов, а значит и доноров, в первом полупроводнике больше, чем во втором.
- Концентрация дырок зависит от эффективной плотности состояний в валентной зоне и от расстояния энергии Ферми от потолка валентной зоны. Поскольку в обоих полупроводниках эти показатели одинаковы то и концентрация дырок в этих полупроводниках одинакова.
- Подвижность как электронов так и дырок определяется двумя факторами: эффективной массой проводимости, которая обратно пропорциональна кривизне зависимости $E(k)$, и длиной свободного пробега носителя заряда, которая в свою очередь обратно пропорциональна количеству центров рассеяния. Основными центрами рассеяния в кристалле являются фононы (концентрация которых зависит от температуры, которая в задаче предполагается для обоих полупроводников одинаковой, поскольку не оговорено иное) и ионы примесных атомов.
- Концентрация фононов одинакова в обоих полупроводниках, т.к. одинакова температура. Ионов же примеси больше в первом полупроводнике.
- Таким образом, подвижность электронов в первом полупроводнике будет меньше, чем во втором.
- Подвижность же дырок в первом полупроводнике так же будет меньше из-за большего количества центров рассеяния.