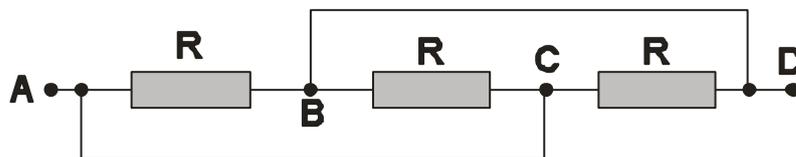


Олимпиада для студентов и выпускников – 2018 г.

Направление «Электроника и наноэлектроника»

Время выполнения задания – 240 мин.

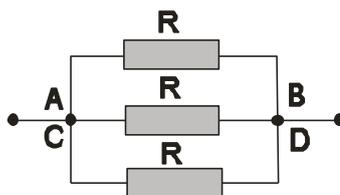
Задача 1 (5 баллов)



Три одинаковых сопротивления соединены, как показано на рисунке. Определить сопротивление между точками A и D.

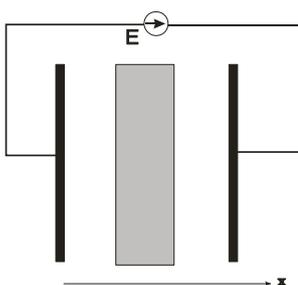
**Решение.**

Точки A и C имеют одинаковый потенциал, т.к. соединены проводом, сопротивлением которого можно пренебречь. Точно так же одинаковы потенциалы точек B и D. Поэтому концы сопротивлений A, C и, соответственно, B, D можно считать соединенными вместе. Таким образом, сопротивления AB, CB, CD соединены параллельно. Соответствующая схема представлена на рисунке:



Полное сопротивление равно  $R/3$ .

Задача 2 (10 баллов)



Между пластин плоского воздушного конденсатора, подсоединенного к источнику ЭДС  $E$ , вставлена пластина диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Нарисовать качественно зависимость напряженности электрического поля от координаты  $x$ .

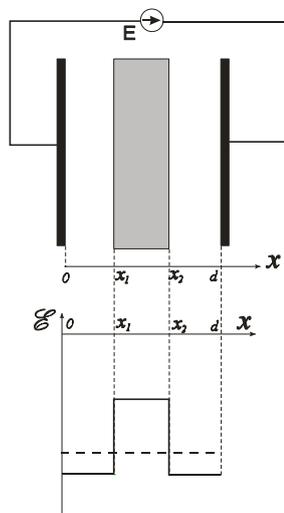
На том же графике (пунктиром) нарисовать, как изменится эта зависимость, если диэлектрическую пластину убрать.

**Решение.**

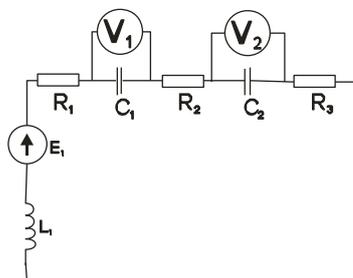
Поскольку вектор электрической индукции  $D = \epsilon E$  между пластинами конденсатора не зависит от координаты, то напряженность электрического поля будет меняться обратно

## Олимпиада для студентов и выпускников – 2018 г.

пропорционально диэлектрической постоянной. Соответственно зависимость  $E = f(x)$  будет выглядеть, как показано на рисунке. Пунктиром на рисунке изображена та же зависимость при отсутствии диэлектрика.



В зоне, где был диэлектрик, поле увеличится, а на остальных участках - уменьшится, т.к. интеграл от поля по координате (при интегрировании от 0 до  $d$ ) в обоих вариантах равен напряжению источника питания.

**Задача 3 (10 баллов)**

Для заданной схемы определить показания вольтметров в стационарном случае, если известно:  $E_1=100$  В,  $R_1=10$  Ом,  $R_2=20$  Ом,  $R_3=30$  Ом,  $C_1=100$  пФ,  $C_2=200$  пФ,  $L_1=10$  Гн. Ответ обосновать.

**Решение.**

Поскольку постоянный ток через конденсаторы не течет, то наличие в схеме резисторов и индуктивностей никак не влияет на распределение напряжений на конденсаторах.

При последовательном соединении конденсаторы заряжаются одинаковым количеством электричества, так как непосредственно от источника тока заряжаются только крайние пластины, а остальные пластины заряжаются через влияние. При этом заряд пластины 2 будет равен по величине и противоположен по знаку заряду пластины 1, заряд пластины 3 будет равен по величине и противоположен по знаку заряду пластины 2.

Напряжения на конденсаторах будут различными, так как для заряда одним и тем же количеством электричества конденсаторов различной емкости всегда требуются различные напряжения. Чем меньше емкость конденсатора, тем большее напряжение необходимо для того, чтобы зарядить этот конденсатор требуемым количеством электричества, и наоборот.

## Олимпиада для студентов и выпускников – 2018 г.

Таким образом, при заряде группы конденсаторов, соединенных последовательно, на конденсаторах малой емкости напряжения будут больше, а на конденсаторах большой емкости — меньше.

Напряжения на каждом из конденсаторов найдем из следующей системы уравнений

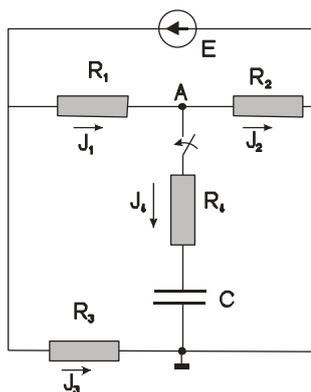
$$1) \frac{V_1}{V_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

$$2) V_1 + V_2 = E$$

Ответ:  $V_1 \approx 66,6$  В;

$V_2 \approx 33,3$  В

**Задача 4 (10 баллов)**



Дано:  $E = 100$  В,  $R_1 = 5$  Ом;  $R_2 = R_3 = R_4 = 40$  Ом,  $C = 250$  пФ

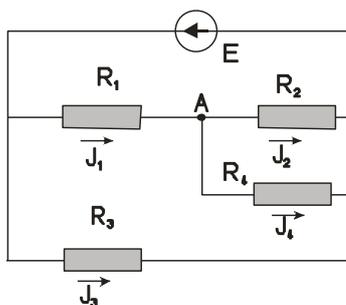
- Определить значения токов в ветвях и напряжение на емкости до момента коммутации.
- Определить значения токов в ветвях и напряжение на емкости в первый момент после коммутации.
- Нарисовать качественную зависимость напряжения на емкости от времени.
- Определить установившиеся значения токов в ветвях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

**Решение.**

- До коммутации

$$J_1 = J_2 = 2,222 \text{ А}; \quad J_3 = 2,5 \text{ А}; \quad J_4 = 0; \quad V_C = 0$$

- В первый момент после коммутации сопротивление емкости равно 0 и схема приобретает следующий вид:



$$J_1 = 100 \text{ В} / 25 \text{ Ом} = 4 \text{ А}; \quad J_3 = 2,5 \text{ А}; \quad J_2 = J_4 = 2 \text{ А}; \quad V_C = 0$$

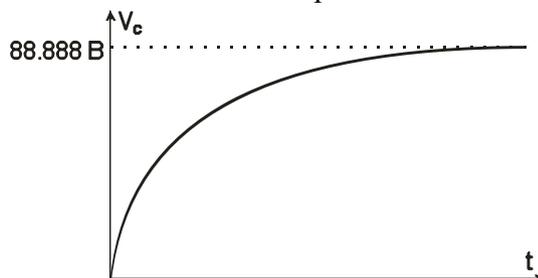
## Олимпиада для студентов и выпускников – 2018 г.

- Установившиеся значения токов в ветвях и напряжения на емкости после коммутации:

$$J_1 = J_2 = 2,222 \text{ A}; \quad J_3 = 2,5 \text{ A}; \quad J_4 = 0$$

$$V_C = 88.888 \text{ В}$$

- Зависимость напряжения на емкости от времени:

**Задача 5** (20 баллов)

Монокристалл кремния легирован одновременно бором с энергией активации  $E_A = (E_v + 0.045)$  эВ в количестве  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  и фосфором с энергией активации  $E_D = (E_c - 0.045)$  эВ в количестве  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

- Определить равновесную концентрацию электронов и дырок в этом материале при комнатной температуре. Считать концентрацию собственных носителей заряда при комнатной температуре равной  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ .
- Нарисовать (качественно) энергетическую диаграмму этого полупроводника для комнатной температуры (с обозначением энергии Ферми)
- Определить положение энергии Ферми в этом материале при 0 К.

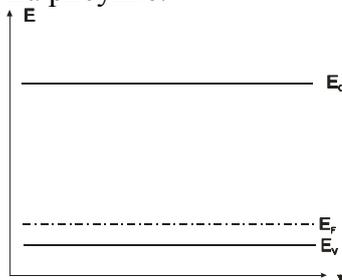
Решение объяснить.

**Решение.**

- Поскольку акцепторов (бора) в материале больше, чем доноров (фосфора), то получившийся материал будет *p*-типа с равновесной концентрацией основных носителей заряда (дырок)  $p_0$ , равной разности  $10^{17} \text{ см}^{-3} - 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Концентрацию электронов в этом материале можно найти из закона действующих

$$\text{масс: } n_0 \cdot p_0 = n_i^2. \text{ Отсюда } n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{10^{20}}{5 \cdot 10^{16}} = 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$$

- Энергетическая диаграмма этого полупроводника при комнатной температуре имеет вид, изображенный на рисунке:



- При нуле Кельвина уровень  $E_D$  будет полностью свободен, а уровень  $E_A$  будет заполнен частично. Следовательно, вероятность заполнения уровня  $E_A$  будет находиться в интервале от 0 до 1. Это возможно только при условии, что уровень Ферми при 0К будет совпадать с уровнем  $E_A$

Ответ:  $E_F = (E_v + 0.045)$  эВ

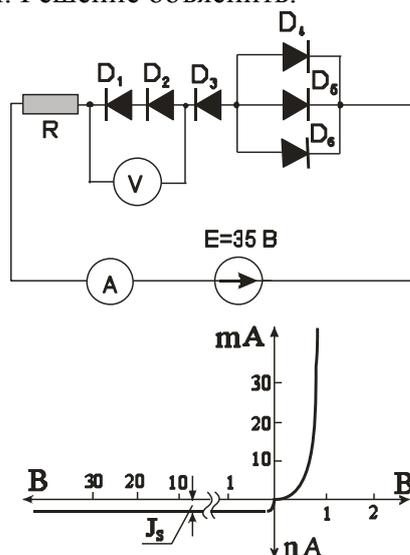
## Олимпиада для студентов и выпускников – 2018 г.

## Задача 6 (20 баллов)

Дано: Электрическая цепь состоит из источника напряжения  $E=35$  В; сопротивления  $R=1$  Мом и соединенных указанным образом семи выпрямительных полупроводниковых диодов. Все диоды тождественны и обладают одинаковыми вольтамперными характеристиками, изображенными на рис. Уравнение вольтамперных характеристик

диодов имеет вид:  $J = J_S \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$ , где  $J_S = 100$  нА,  $q$  – заряд электрона,  $T$  –

температура, равная 300К,  $k$ -постоянная Больцмана (произведение  $kT$  при температуре 300К считать равным 0,025эВ). Определить показания вольтметра с точностью до четвертого знака после запятой. Решение объяснить.

**Решение.**

Как видно из схемы, диоды 1, 2 и 3 соединены последовательно и подключены в прямом направлении, 4, 5 и 6 – заперты и подключены параллельно. Если бы сопротивление  $R$  было бы много больше суммарного сопротивления всех диодов, то ток в цепи был бы порядка  $J \approx \frac{E}{R} = 35$  мкА. Но через каждый из обратнo смещенных диодов  $D_4 - D_6$  течет ток 100 нА. Соответственно, амперметр будет показывать утроенное значение:  $300$  нА =  $3 J_S$ . Такой же ток будет протекать через каждый диод, включенный в прямом направлении. Тогда для диода 1 можно записать следующее уравнение:

$$3J_S = J_S \left( e^{\frac{qV_{D1}}{kT}} - 1 \right)$$

Решаем это уравнение относительно  $V_{D1}$

$$e^{\frac{qV_{D1}}{kT}} = 4$$

$$\text{Отсюда: } V_{D1} = \frac{kT}{q} \ln 4 = 0.025 \ln 4 = 0.0347 \text{ В}$$

Столько же упадет и на диоде 2. Таким образом, вольтметр покажет сумму напряжений

**Ответ:** вольтметр покажет 0,0694 В

## Олимпиада для студентов и выпускников – 2018 г.

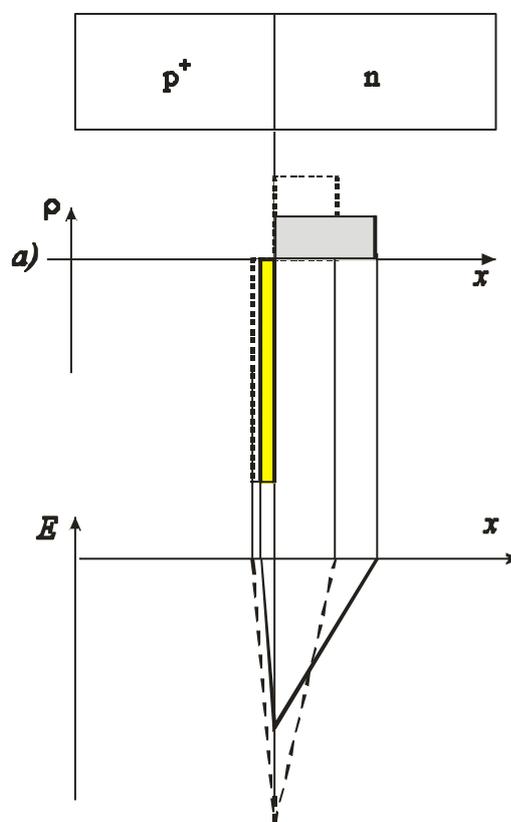
## Задача 7 (25 баллов)



Для резкого (ступенчатого)  $p^+n$ -перехода, находящегося в равновесии, нарисовать эпюры плотности объемного заряда (в приближении объемного заряда) и напряженности контактного электрического поля. На тех же графиках пунктирной линией показать, как изменятся эти зависимости, если концентрацию типозадающей примеси в  $n$ -области увеличить вдвое.

**Решение.**

Сравнительные эпюры плотности объемного заряда и электрического поля будут иметь вид, изображенный на рисунке:



Изменение концентрации примеси в базовой области диода приведет:

- к изменению плотности объемного заряда в  $n$ -области (в два раза),
- к изменению толщины слоя объемного заряда как в  $n$ - так и в  $p$ -области,
- изменится угловой коэффициент (вдвое) зависимости напряженности электрического поля в  $n$ -области а в  $p$ -области угловой коэффициент останется прежним,
- изменится (увеличится) контактная разность потенциалов, т.е. площадь под зависимостью  $E(x)$ , а значит увеличится значение максимального электрического поля.