

Направление «Электроника и нанoeлектроника»

Время выполнения задания – 240 мин.

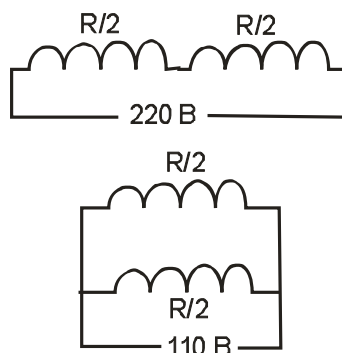
Задача 1 (5 баллов)

Электрическую плитку, рассчитанную на напряжение 220 В, требуется переделать, не меняя и не укорачивая спирали, на 110 В так, чтобы ее мощность осталась прежней. Что нужно для этого сделать?

Решение.

Как известно, мощность P можно определить по формуле:

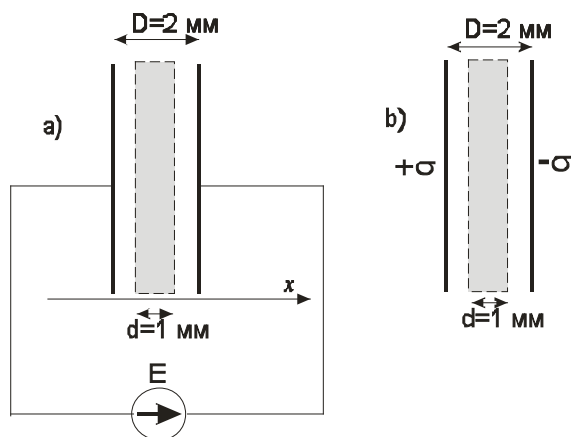
$P = \frac{V^2}{R}$, где V – напряжение, R – сопротивление. Чтобы мощность не менялась при уменьшении напряжения в два раза, сопротивление надо уменьшить в 4 раза. Для этого спираль плитки надо подсоединить к источнику 110 В как показано на рисунке.



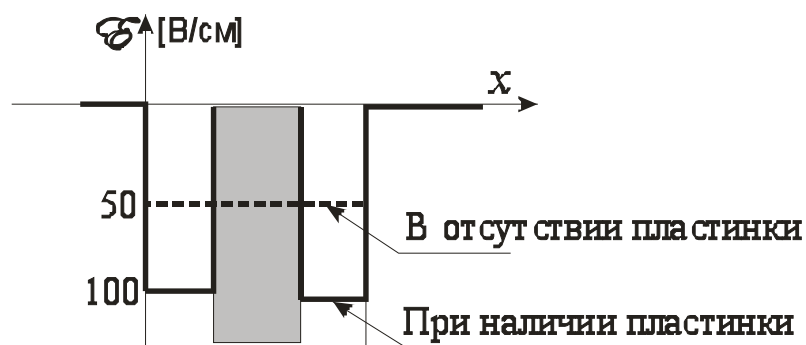
Задача 2 (10 баллов)

а) Плоский конденсатор с расстоянием между обкладками 2 мм подсоединен к источнику напряжения 10 В (см. рис. а). Среда между обкладками – вакуум. Затем между обкладками вставляется металлическая пластина толщиной 1 мм. Нарисовать на одном графике зависимость напряженности электрического поля от координаты x до и после введения пластины.

б) Пластины того же плоского конденсатора заряжены до плотности заряда σ (см. рис. б). Как изменится напряженность электрического поля в вакуумной части конденсатора после введения пластины.

**Решение.**

а) Поскольку внутри металла поле равно нулю, а интеграл от поля по координате между пластинами равно напряжению батареи что при наличии пластины, что без нее, то эпюры напряженности показаны на рис.



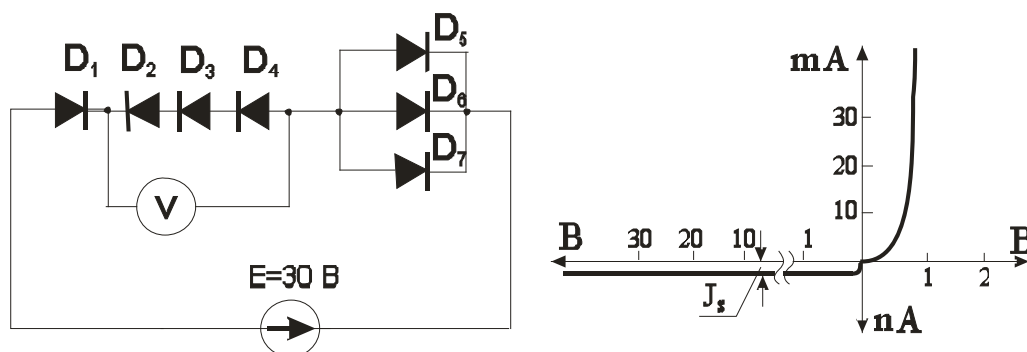
б) Во втором случае поле в вакуумном зазоре между пластинами зависит только от плотности заряда на обкладках не зависимо от наличия или отсутствия между обкладками металлической пластины. Так что напряженность поля в вакуумной части конденсатора не измениться.

Задача 3 (10 баллов)

Дано: Электрическая цепь состоит из источника напряжения $E=30$ В 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: $J = J_s \left(e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right)$ где $J_s=100$ нА – ток

насыщения, q – заряд электрона, T – температура, равная 300К, k -постоянная Больцмана (произведение kT при температуре 300К считать равным 0,025эВ), $(+U)$ - напряжение прямого смещения на диоде, $(-U)$ - напряжение обратного смещения на диоде. Определить показания вольтметра с точностью до третьего знака после запятой. Решение объяснить.

**Решение.**

Как видно из схемы, диоды 1, 5, 6 и 7 заперты (причем диоды 5, 6, 7-включены параллельно), а диоды 2, 3 и 4 соединены последовательно и подключены в прямом направлении. Очевидно, что наибольшим сопротивлением во всей схеме является диод D_1 поэтому через диоды $D_2 - D_4$ будет протекать ток J_S (обратный ток диода D_1). Соответственно для диода D_2 можно записать следующее соотношение:

$$J_S = J_S \left(e^{\frac{qV_{D2}}{kT}} - 1 \right)$$

Решаем это уравнение относительно V_{D2}

$$e^{\frac{qV_{D2}}{kT}} = 2$$

$$\text{Отсюда: } V_{D2} = \frac{kT}{q} \ln 2 \approx 0.025 \ln 2 \approx 0.017 \text{ В}$$

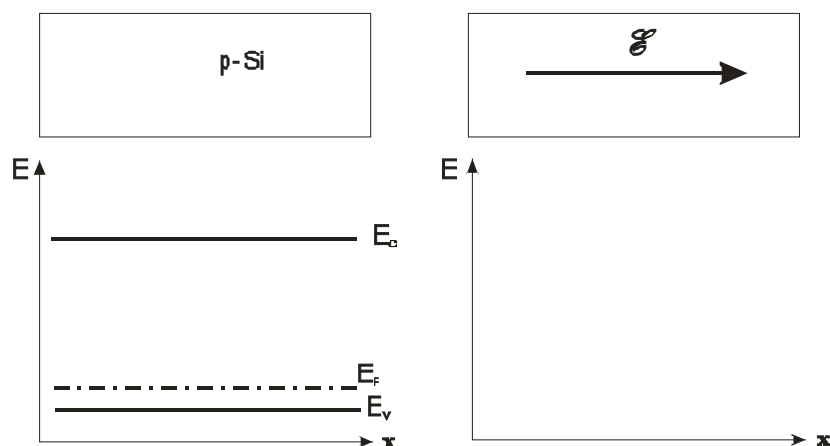
Столько же упадет и на диоде 3 и 4. Таким образом, вольтметр покажет сумму напряжений:

$$V_{D2} + V_{D3} + V_{D4} = 0,051 \text{ В}$$

Ответ: вольтметр покажет 0,051 В

Задача № 4 (10 баллов)

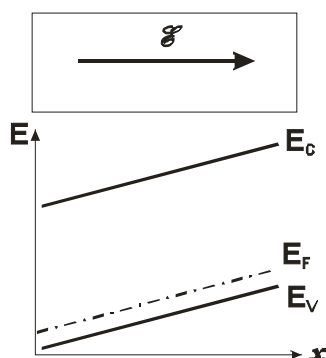
На рисунке (слева) изображен образец p-Si и его энергетическая диаграмма. Как изменится его энергетическая диаграмма, если в образце создать электрическое поле, как показано на рисунке справа.



Решение.

Как известно из зонной теории кристалла на его энергетической диаграмме изображается по оси ординат полная энергия электрона, а по оси абсцисс – пространственная координата. Поскольку на дне зоны проводимости групповая скорость электрона равна нулю, то энергия дна зоны проводимости E_c – это потенциальная энергия электрона. Соответственно в отсутствие электрического поля потенциальная энергия электронов кристалле не зависит от пространственной координаты и на диаграмме $E_c(x)$ изображается горизонтальной линией. Автоматически горизонтально изображается и энергия потолка валентной зоны, и энергия Ферми.

Если в образце создано однородное электрическое поле, совпадающее по направлению с осью x , то на электроны будет действовать сила Кулона, направленная в противоположную сторону. Следовательно, перемещая электрон вдоль оси x , придется преодолевать силу Кулона и, значит, потенциальная энергия электрона будет увеличиваться с ростом x . Аналогично будет меняться и потолок валентной зоны и энергия Ферми. В результате энергетическая диаграмма образца станет выглядеть, как показано на рисунке.



Задача 5 (20 баллов)

Имеется два плоских кремниевых n^+p -перехода одинаковых геометрических размеров при комнатной температуре. Ток насыщения J_{s1} первого перехода вдвое больше, чем у второго J_{s2} . Эмиттерные области переходов легированы донорами одинаково.

Сравнить (на одном графике) эпюры плотности объемного заряда и напряженности электрического поля для этих переходов для равновесного состояния.

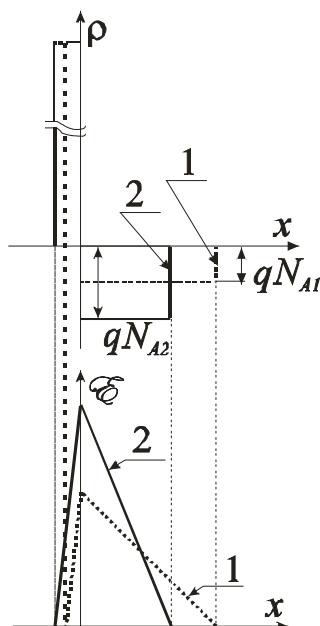
Ответ объяснить.

Решение.

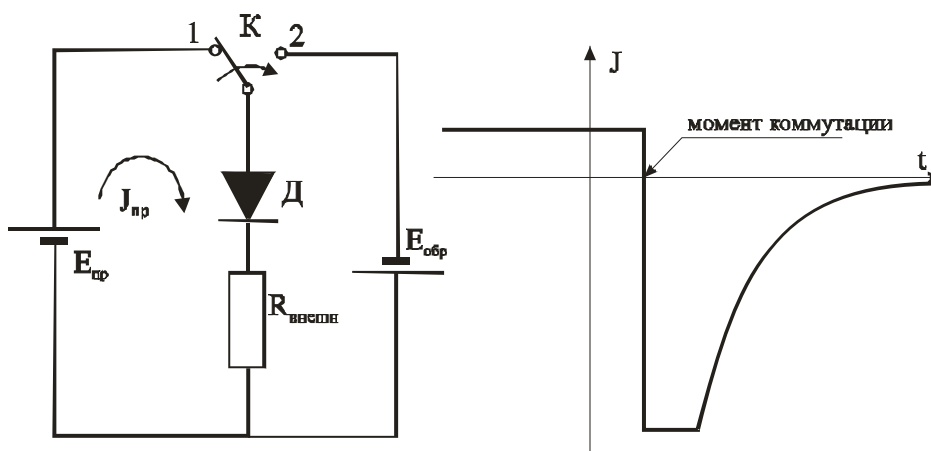
Как следует из теории p - n -перехода, ток насыщения J_s пропорционален равновесной концентрации неосновных носителей заряда в базовой области перехода, в нашем случае пропорционален концентрации электронов n_{p0} в p -областях этих переходов. В свою очередь равновесная концентрация неосновных носителей заряда связана с концентрацией основных носителей заряда p_{p0} , которая равна концентрации типозадающей примеси (в данном случае акцепторов N_A) законом действующих масс $p_{p0} \cdot n_{p0} = n_i^2$, где n_i - концентрация собственных носителей заряда, зависящая от ширины запрещенной зоны полупроводника и температуры.

Из условия, что $J_{s1} = 2J_{s2}$ следует, что $N_{A2} = 2 N_{A1}$. А значит и плотность объемного заряда в базе 2 перехода в два раза больше плотности объемного заряда в базе 1 го перехода, а толщина слоя объемного заряда в базе первого перехода в $\sqrt{2}$ раз больше аналогичной толщины объемного заряда второго перехода (см. рисунок).

Зависимости $\rho(x)$ и $E(x)$ для обоих переходов показаны на рисунке. Угловые коэффициенты зависимости $E(x)$ пропорциональны концентрации примеси в соответствующей области перехода. Соответственно в p -области угловой коэффициент зависимости $E(x)$ второго перехода увеличивается в 2 раза, а в n -области - останется без изменения.



Задача 6 (20 баллов)



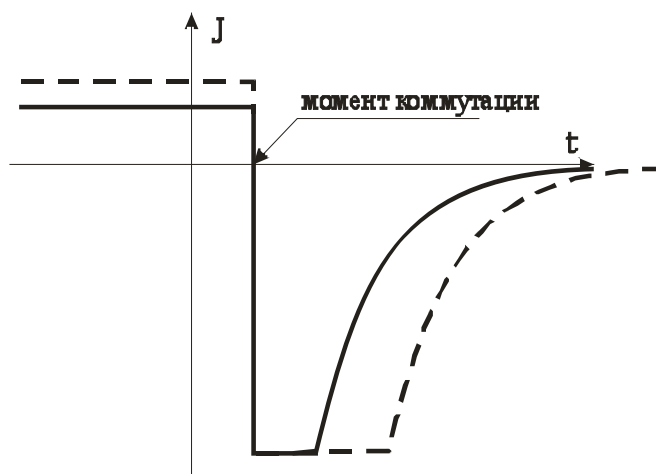
На рисунке изображена схема переключения выпрямительного диода, выполненного на базе германиевого p - n -перехода, с прямого смещения на обратное, и соответствующая этому процессу стилизованная осциллограмма тока через диод. Предполагается, что напряжение батареи $E_{\text{обр}}$ много больше напряжения $E_{\text{пр}}$.

Как изменится осциллограмма тока через диод, если увеличить напряжение $E_{\text{пр}}$, не изменяя остальных параметров схемы.

Решение.

Поскольку наличие «полочки» на осциллограмме тока связано с диффузионной емкостью перехода, т.е. с накопленным зарядом неосновных

носителей главным образом в базовой области диода. И величина этого накопленного заряда и, соответственно длительность «полочки», пропорциональна прямому току перехода. Амплитудное значение обратного тока зависит в первую очередь от величины напряжения $E_{обр}$, которое остается постоянным. Соответственно осциллограмма переходного процесса при большем значении $E_{пр}$ изображена на рисунке пунктирной линией.



Задача 7 (25 баллов)

Имеется два кремниевых выпрямительных диода, выполненных на базе ступенчатых (резких) p^+n -переходов одинаковых геометрических размеров, при комнатной температуре. Напряжение электрического пробоя первого диода больше, чем у второго. Сравнить (на одном графике) вольт-фарадные характеристики (зависимости $C_{бар}^{-2} = f(V)$) для этих диодов. $C_{бар}$ – барьерная (зарядовая) емкость p - n -перехода, V – напряжение смещения.

Ответ объяснить.

Решение.

Как известно, вольт-фарадная характеристика резкого и резко несимметричного перехода в координатах $C_{бар}^{-2} = f(V)$ при обратном смещении имеет вид линейной зависимости (см. рис.) с угловым коэффициентом, зависящим от площади перехода и от концентрации типозадающей примеси N_B в базовой области диода:

$$C_{бар}^{-2} = \frac{2(V_0 \pm V_{p-n})}{\epsilon \epsilon_0 S^2 q N_B}$$

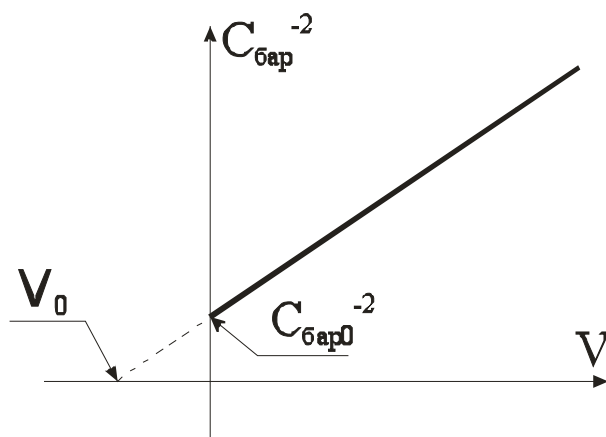


График прямой линии можно однозначно задать любыми двумя точками. В данном случае это V_0 (V_0 – равновесная контактная разность потенциалов) и $C_{бар0}^{-2}$ ($C_{бар0}$ – барьерная емкость перехода в равновесном состоянии).

Равновесная контактная разность потенциалов определяется соотношением:

$$V_0 = \frac{\varphi_0}{q} = \frac{|\mu_p| - |\mu_n|}{q}$$

где φ_0 – равновесная контактная разность потенциальных энергий, $|\mu_n|$ – расстояние энергии Ферми от дна зоны проводимости в n -области, $|\mu_p|$ – расстояние энергии Ферми от дна зоны проводимости в p -области, q – заряд электрона. Значение энергии Ферми в базовой области перехода зависит от концентрации типозадающей примеси N_B в базовой области диода.

Поскольку напряжение электрического пробоя первого диода больше, чем у второго, то $N_{B1} < N_{B2}$ и, следовательно, $V_{02} > V_{01}$. Однако концентрация примеси меняется гораздо сильнее, чем контактная разность потенциалов. Соответственно, $(C_{бар0}^{-2})_1 > (C_{бар0}^{-2})_2$.

С учетом сказанного, качественный сравнительный вид вольт-фарадных характеристик диодов показан на рисунке.

