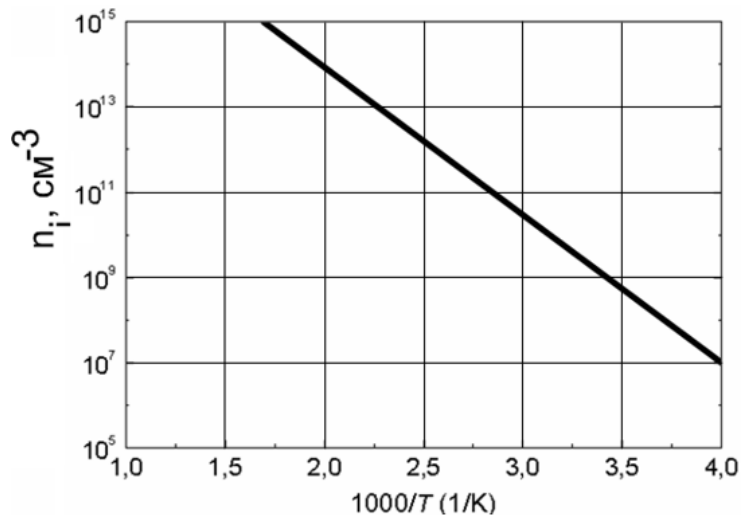


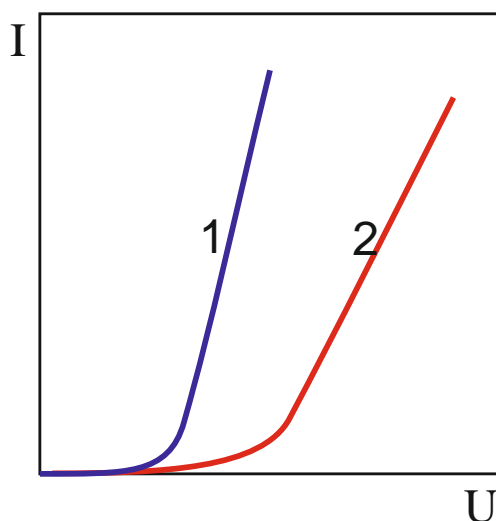
## Задачи к зачету по дисциплине «Твердотельная электроника»

1. На рисунке изображен график зависимости собственной концентрации носителей заряда от температуры широко используемого в микроэлектронике полупроводника. Оценив его ширину запрещенной зоны, определите материал полупроводника.



2. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в германии при  $T=300$  К. Эффективную массу дырок считать равной  $0.36 \cdot m_0$ , а электронов –  $0.55 \cdot m_0$ , где  $m_0$  – масса электрона в вакууме. Ширина запрещенной зоны при комнатной температуре в германии составляет  $0.66$  эВ. Изменится ли (и если изменится, то как) величина и тип проводимости чистого германия, если ввести в него примесь As (расстояние от уровня примеси до ближайшей разрешенной зоны  $0.014$  эВ)?
3. Оценить температуру, при которой достигается экстремальное значение уровня Ферми в невырожденном полупроводнике, содержащем один тип однозарядных доноров.  $N_d=10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $m_n^* \approx m_0$ . Качественно пояснить, чем будет являться экстремум – максимумом или минимумом?
4. У кристаллов InSb диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 17$  и эффективная масса электронов  $m^* = 0.015 m_0$ . Исходя из водородоподобной планетарной модели атома примеси оценить радиус орбиты электрона, находящегося в InSb на примесном энергетическом уровне в основном состоянии, и глубину залегания примесного уровня в запрещенной зоне (энергию ионизации атома донорной примеси).
5. Определить относительное изменение проводимости тонкого полупроводникового образца при стационарном освещении с интенсивностью  $I=5 \cdot 10^{15}$  1/с·см<sup>2</sup>. Коэффициент поглощения  $\gamma=100$  см<sup>-1</sup>; равновесная концентрация электронов составляет  $n_0=10^{15}$  см<sup>-3</sup>; время жизни  $\tau=2 \cdot 10^{-4}$  с; отношение подвижностей электронов и дырок  $\mu_n/\mu_p \approx 2$ .

6. При  $T=300$  К удельное сопротивление образца собственного кремния составляет  $2,3 \cdot 10^5$  Ом·см. Какова концентрация собственных носителей заряда? Если через образец пропустить ток, то какая его часть будет обусловлена электронами? Считать, что  $\mu_n=1400$  см<sup>2</sup>/В·с;  $\mu_p=450$  см<sup>2</sup>/В·с. Качественно объясните, будет ли постоянная Холла в данном образце отличаться от нуля.
7. В однородный полубесконечный электронный полупроводник на поверхности стационарно инжектируются дырки. В направлении вглубь образца приложено электрическое поле  $E=10$  В/см. Определить, на каком расстоянии от поверхности образца концентрация неравновесных дырок уменьшится в 1,5 раза. Диффузионная длина дырок  $L_p=0,1$  см.
8. На примере  $n^+/n^-$  контакта вывести соотношение Эйнштейна. Какими зарядами образовано встроенное электрическое поле в переходе? Найти диффузионную длину электронов в невырожденном германии при температуре  $T = 300$  К, если время жизни электронов составляет  $\tau_n = 10^{-4}$  с, а их подвижность -  $\mu_n=3800$  см<sup>2</sup>/В·с.
9. Определить толщину обедненной области резкого несимметричного германиевого перехода в равновесном случае и при подаче смещения  $+0,1$  В, если концентрации легирующей примеси в  $p$ - и  $n$ -областях составляют  $2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> и  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, соответственно. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon=16$ , концентрация носителей заряда в собственном полупроводнике  $n_i=2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.
10. Изобразить и объяснить эквивалентную схему диода. Получить выражение для дифференциального сопротивления реального  $p$ - $n$  перехода (с учетом сопротивления базы) в зависимости от внешнего напряжения.
11. Оценить величину плотности тока тепловой генерации  $p$ - $n$  перехода, если концентрации примесей в  $p$  и  $n$  областях составляют, соответственно,  $N_A=2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>,  $N_D=2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Подвижности дырок и электронов считать равными  $\mu_p=1900$  см<sup>2</sup>/Вс,  $\mu_n=3200$  см<sup>2</sup>/Вс. Времена жизни носителей заряда  $\tau_p=\tau_n=10^{-3}$  с. Концентрация носителей в собственном полупроводнике  $n_i=2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Найти величину тока при внешнем напряжении  $V=+0,1$  В;  $V=-0,5$  В;  $V=-2$  В. Площадь перехода составляет 1 мм<sup>2</sup>.
12. Пусть имеются кремниевый и германиевый диоды одинаковой конструкции. Прямые ВАХ диодов изображены на рисунке. Установите соответствие номера диода и материала, из которого он изготовлен. Качественно изобразите и объясните ход обратных ветвей ВАХ.



13. Оценить контактную разность потенциалов в германиевом  $p$ - $n$  переходе. Удельное сопротивление  $p$  и  $n$  областей  $\rho=2$  Ом·см. Как изменится высота энергетического барьера при изменении напряжения с  $V=+0,1$  В до  $V=-5$  В? Нарисовать зонные диаграммы для всех случаев, соблюдая масштаб. Концентрация носителей в собственном полупроводнике  $n_i=2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . Изменится ли (и если изменится, то как) контактная разность потенциалов, если полупроводниковую структуру нагреть?
14. Исходя из среднего времени свободного пробега ( $\tau \approx 10^{-13}$  с), эффективной массы электронов ( $m_n^* = 0.36 \cdot m_0$ ) и ширины запрещенной зоны ( $W_g = 0.66$  эВ) оценить напряженность поля, при которой возникает лавинный пробой в германии. Оценить напряжение пробоя в резко несимметричном германиевом  $p^+$ - $n$  переходе. Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 16$ . Концентрация доноров в  $n$ -области  $N_D=2 \cdot 10^{15}$  см $^{-3}$ .
15. Найти контактную разность потенциалов в диоде Шоттки  $n$ -Ge/Au. Нарисовать зонную диаграмму контакта при термодинамическом равновесии. Удельное сопротивление полупроводника  $\rho=1$  Ом·см. Работа выхода электронов из золота 4,7 эВ. Электронное сродство Ge 4 эВ, ширина запрещенной зоны  $W_g=0,66$  эВ. Концентрация электронов в собственном германии составляет  $n_i=2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . Подвижность электронов считать равной  $\mu_n=3500$  см $^2$ /Вс. Определить толщину несмещенного перехода, если диэлектрическая проницаемость составляет  $\epsilon=16$ .
16. Имеется идеальная структура металл/диэлектрик/полупроводник  $n$ -типа. Разница энергий между уровнем Ферми и серединой запрещенной зоны в полупроводнике  $F-W_i=-e\phi_0$ . Доказать, что при значении поверхностного потенциала  $\psi_s=2\phi_0$  вблизи границы полупроводника и диэлектрика будет содержаться слой инверсной проводимости. Нарисовать зонные диаграммы структуры при  $\psi_s=0$  и при  $\psi_s=2\phi_0$ .

17. Нарисовать зонные диаграммы областей затвор-диэлектрик-полупроводник МДП-транзисторов со встроенным и индуцированным каналами  $n$ -типа в поперечном направлении. Объяснить разницу в морфологии приборных структур.
18. Найти профиль напряженности электрического поля в базе дрейфового биполярного  $p-n-p$  транзистора при экспоненциальном распределении легирующей примеси в базе  $N_d = N_0 \cdot e^{\alpha x}$ , где  $x$ -координата вдоль базы (в направлении от эмиттера к коллектору). Убывающей или возрастающей должна быть зависимость концентрации примеси от координаты для получения положительного эффекта от наличия поля в базе (определить знак  $\alpha$ )? Нарисовать зонную диаграмму в равновесном случае.
19. Определить сдвиг длинноволновой границы рабочего диапазона германиевого фотодиода при его охлаждении от комнатной температуры (300 К) до температуры жидкого азота (78 К). Зависимость ширины запрещенной зоны от температуры для германия  $W_g = 0.742 - 4.8 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 / (T + 235)$  (эВ). Почему темновой ток германиевого фотодиода больше, чем кремниевого?
20. Для барьера Шоттки вывести выражение для максимальной напряженности электрического поля в области пространственного заряда в приближении полного обеднения. Для структуры  $n\text{-GaAs/Au}$  рассчитать значение этой величины при внешнем напряжении  $V = 0$  В. Нарисовать зонную диаграмму. Концентрация легирующей примеси в полупроводнике  $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , контактная разность потенциалов  $V_k = 0,48$  В.
21. Получить выражение для крутизны полевого транзистора с управляющим  $p-n$  переходом.

*В качестве вспомогательных материалов при необходимости использовать зависимости удельного сопротивления и подвижностей носителей зарядов в различных полупроводниках от концентрации легирующей примеси.*

## Вспомогательные материалы

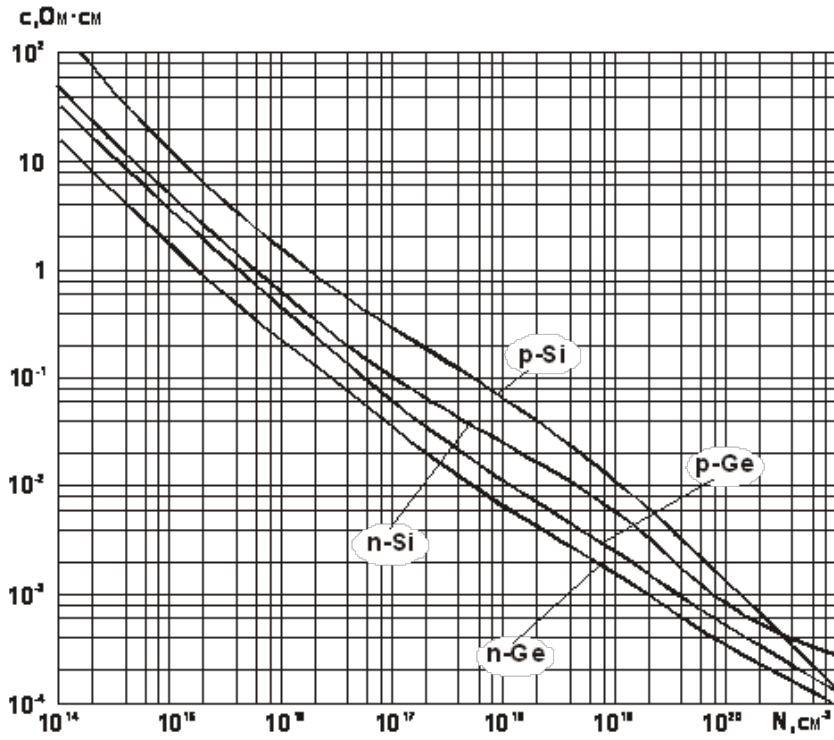


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления Si и Ge от концентрации легирующей примеси.

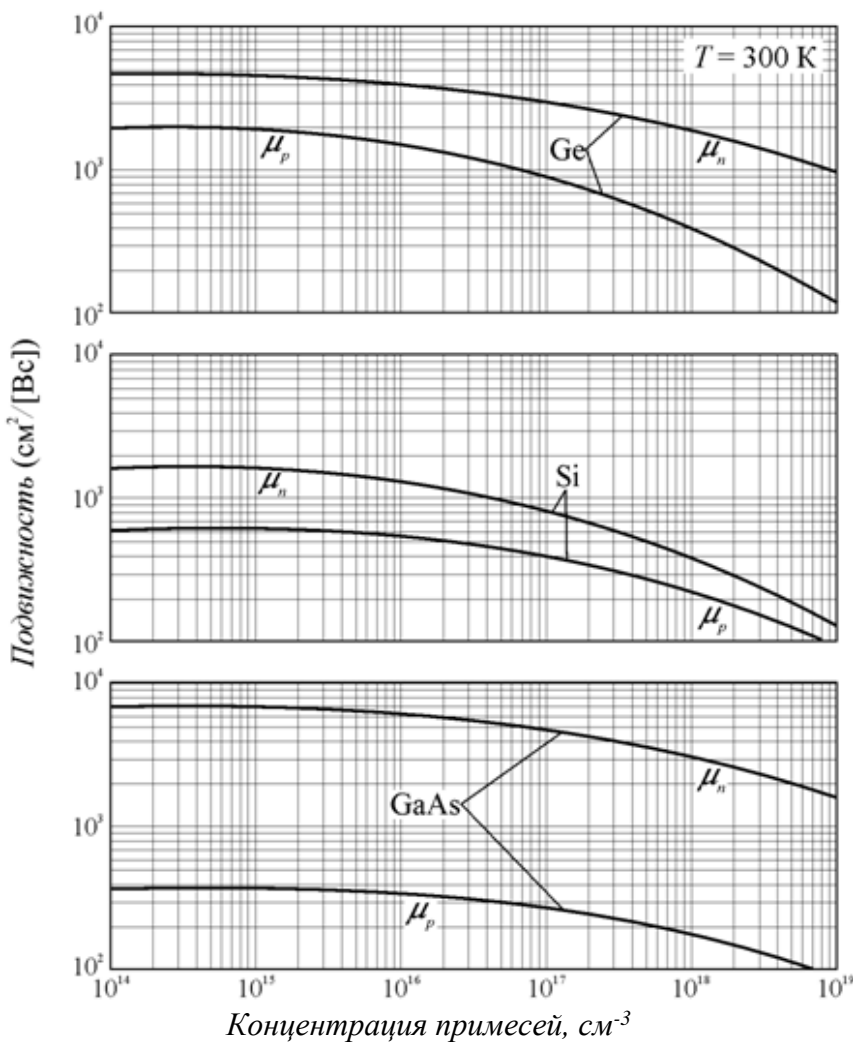


Рис. 2. Зависимость подвижности от концентрации легирующей примеси в основных материалах полупроводниковой электроники.