

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

Приборы и принадлежности: миллиамперметр (авометр), вольтметр постоянного тока (150 – 500 В), варистор СН-1, ЛАТР.

Цель работы: исследование зависимости электропроводимости материала варистора от напряженности электрического поля.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ.

1.Нарушения закона Ома. Концентрация и подвижность носителей заряда до некоторой величины напряженности электрического поля не зависят от напряженности электрического поля, следовательно, и удельная электропроводность полупроводника $[\sigma = q_0(n\mu_n + p\mu_p)]$ не зависит от напряженности электрического поля. Электрические поля, которые практически не меняют подвижность и концентрацию носителей заряда, называются слабыми.

Минимальная напряженность поля E_K , при которой начинается заметная зависимость подвижности и концентрации носителей заряда от напряженности электрического поля, называется критической. Критическая напряженность E_K электрического поля зависит от природы полупроводника, температуры и концентрации примесей. Электрические поля, для которых подвижность и концентрация носителей заряда зависит от напряженности электрического поля, называются сильными. При напряженности выше критической закон Ома уже не выполняется, т.е. величина плотности тока j ($j = \sigma E$) не будет пропорциональна напряженности поля. Для значительного числа полупроводников величина E_K колеблется вблизи 10^6 В/м, для селена $E_K \approx 10^3$ В/м. Напряженность E_K определяется тем условием, что дополнительная дрейфовая скорость V_d , приобретаемая носителем заряда в поле, становится сравнимой с тепловой скоростью. При уменьшении температуры напряженность E_K уменьшается, так как E_K зависит от подвижности носителей заряда, а чем ниже температура, тем больше подвижность μ .

Критические поля в неоднородных полупроводниках могут появляться при очень малых напряжениях, т.к. на неоднородном слое малой толщины падает почти все приложенное напряжение и локальная напряженность поля сильно возрастает. В зависимости от доминирующего механизма рассеяния носителей заряда в полупроводниках подвижность σ ($\sigma = \frac{q_0 \lambda}{m^* V}$) может увеличиваться или уменьшаться при увеличении напряженности электрического поля выше критической. Подвижность начинает зависеть от поля с того момента, как скорость V перестает быть постоянной, т.е. когда добавкой V_D к скорости V за счет скорости нельзя пренебречь, по сравнению с тепловой скоростью. Так, например, в атомных кристаллах (Ge, Si) при тепловом механизме рассеяния λ не зависит от скорости V , а $V(V = V_T + V_D)$ растет с ростом напряженности E ($v \sim \sqrt{E}$), подвижность уменьшается с ростом поля:

$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E}} \sim E^{-1/2} \quad (1)$$

При рассеянии носителей заряда на ионизированных примесях $\lambda \sim v^4$, $v \sim \sqrt{E}$ подвижность σ увеличивается с ростом поля:

$$\sigma \sim (\sqrt{E})^3 \sim E^{3/2} \quad (2)$$

Однако изменение подвижности носителей заряда, как показывают результаты опытов, незначительное. С ростом поля концентрация носителей заряда значительно возрастает.

Основными причинами изменения концентрации носителей заряда в сильных электрических полях могут быть термоэлектронная ионизация Френеля и электростатическая ионизация.

Термоэлектронная ионизация Френеля. При увеличении напряженности электрического поля ($E \geq 10^6$ В/м) увеличивается сила $q_0 E$, действующая на электрон и изменяющая энергетическое состояние электрона в кристалле. Уменьшение величины потенциального барьера, разделяющего два соседних узла кристаллической решетки, можно оценить величиной:

$$\Delta\Pi = 2q_0 E r_0 \quad (3)$$

где q_0 – заряд электрона, E – напряженность поля, r_0 – расстояние от электрона до ядра, на котором сила притяжения к ближнему ядру уравнивается внешней силой, т.е.

$$\frac{q_0^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_0^2} = q_0 E \quad (4)$$

откуда

$$r_0 = \sqrt{\frac{q_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0 E}} \quad (5)$$

Подставляя значение r_0 в формулу (3) получим выражение для уменьшения величины потенциального барьера $\Delta\Pi$:

$$\Delta\Pi = 2q_0 \sqrt{\frac{q_0 E}{4\pi\epsilon\epsilon_0}} \quad (6)$$

Вследствие этого энергия, которую необходимо затратить на перевод электронов в зону проводимости, уменьшается на величину $\Delta\Pi$, а вероятность тепловой ионизации возрастает. Согласно статистике Больцмана вероятность термического возбуждения увеличивается на величину

$$e^{\frac{\Delta\Pi}{kT}} = e^{\beta\sqrt{E}} \quad (7)$$

где

$$\beta = \frac{2}{kT} \sqrt{\frac{q_0^3}{4\pi\epsilon\epsilon_0}}$$

При этом концентрация носителей увеличивается по закону Френеля

$$n = n_0 e^{\beta\sqrt{E}} \quad (8)$$

Этот эффект играет роль при $E > 10^7 - 10^8$ В/м и экспоненциально растет с ростом температуры.

Ударная и электростатическая ионизация. Сильное электрическое поле ($E > 10^6$ В/м), действуя на электроны атомов полупроводника, вызывает наклон энергетических зон (рис.1) т.к. потенциальная энергия электрона во внешнем электрическом поле напряженностью E будет определяться его координатой x

$\Pi_1 = -q_0 E x$, а полная энергия электрона в полупроводнике при наличии внешнего электрического поля $E_1 = E + \Pi_1$, где E – энергия электрона в отсутствие поля.

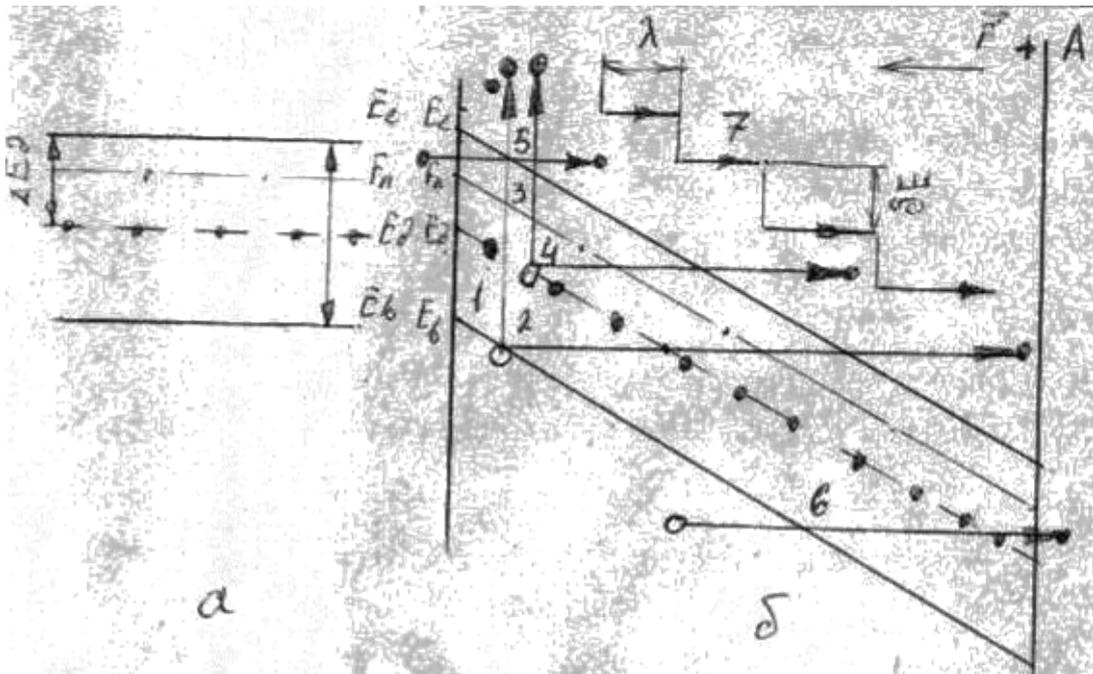


Рис. 1. Энергетические зоны донорного полупроводника:

а – без электрического поля, б – в сильном электрическом поле (искривление зон энергии).

Уровни энергии электронов поднимаются, если $\Pi_1 > 0$ и опускаются при $\Pi_1 < 0$. Ширина запрещенной зоны же для каждого значения координаты x не изменяется. Например, в донорном полупроводнике (рис. 1) благодаря наклону зон электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости путем 1 или 2, с донорных уровней в зону проводимости путем 3 или 4, с катодов в зону проводимости путем 5, из валентной зоны в анод путем 6.

На вертикальный переход 1 и 3 требуется затрата энергии (термоэлектронная ионизация или ударная ионизация), а на горизонтальный переход 2, 4, 5 и 6 не требуется затраты и изменения энергии (туннельный переход или эффект Зинера).

В сильных полях ($E \approx 10^6 - 10^8$ В/м) свободный электрон (или дырка) может приобрести энергию за время свободного пробега λ , достаточную для ионизации примесного атома ΔE_d или атома основной решетки ΔE , и перевести электроны с этих уровней в зону проводимости (рис. 1, переходы 3, 1) или из валентной зоны на акцепторные уровни E_a , при этом сам электрон сохранит энергию, достаточную для пребывания в зоне проводимости, т.е. в результате ударной ионизации электрон лишь смещается в пределах зоны проводимости с верхнего уровня на нижний. Свободный электрон, двигаясь в зоне проводимости к аноду, при столкновении с

атомом примеси или атомом основной решетки опускается по энергетическим “ступенькам” γ (рис. 1), где λ – средняя длина свободного пробега, δE – средняя величина энергии, которую теряет электрон при каждом акте соударения.

Т.к. энергия активации примесей ΔE_d , ΔE_a , обычно меньше ширины запрещенной зоны ΔE , то в сильном электрическом поле сначала ионизируются примесные атомы, а затем уже атомы основной решетки. Явление ударной ионизации может происходить и в результате действий внутренних полей, обусловленных локальными неоднородностями кристалла или полем $p - n$ – перехода. Ударная ионизация проявляется при тем меньших полях, чем меньше температура и энергия активации и больше подвижность.

Теоретические оценки и опыт показывают, что ударная ионизация начинает играть роль при полях $10^6 - 10^8$ В/м. При еще больших полях ($E \geq 10^9$ В/м) возможна электростатическая ионизация, горизонтальные переходы, 2, 4 электронов с донорных уровней или из валентной зоны в зону проводимости. Электростатическая ионизация становится возможной благодаря тому, что в достаточно сильном электрическом поле электрон имеет определенную вероятность перехода через запрещенную зону без изменения энергии, т.е. туннельным эффектом.

Вероятность электростатической ионизации (туннельного перехода) например типа 2, при напряженности поля E

$$w = \exp \left[\frac{\pi^2 (2m^*)^{1/2} (\Delta E)^{3/2}}{hq_0 E} \right] \quad (9)$$

Вероятность туннельного перехода одинакова как для переходов из валентной зоны в зону проводимости, так и из зоны проводимости в валентную. Но поскольку концентрация электронов в валентной зоне превосходит концентрацию электронов в зоне проводимости, то поток электронов будет направлен из валентной зоны в зону проводимости. Еще более вероятен туннельный переход на контакте полупроводника и металла (переходы 5, 6), если при этом ширина барьера не увеличивается областью объемного заряда.

Наряду с ростом дополнительных носителей заряда за счет ионизации при повышении напряженности поля происходит и обратный процесс – рекомбинация

электронов с дырками. В результате этих двух процессов устанавливается определенная стационарная концентрация носителей заряда при заданном поле, увеличивающаяся с ростом напряженности поля. При слишком больших электрических полях происходит лавинообразное нарастание носителей заряда и пробой полупроводника, обусловленный главным образом электростатической и ударной ионизацией.

В некоторых полупроводниках (арсенид галлия, фосфид галлия и др.) в сильных электрических полях наблюдаются высокочастотные осцилляции тока. Высокочастотные осцилляции тока (периодические колебания) при наложении на полупроводник постоянного напряжения называются *эффектом Ганна*.

Одно из объяснений эффекта Ганна может состоять в следующем. При наложении электрического поля электроны переходят в более высокие энергетические состояния, температура электронного газа повышается. При этом взаимодействуя с фононами, электроны могут быть переброшены на такие энергетические уровни, где их эффективная масса больше, а подвижность меньше и ток уменьшается. Однако состояния электронов на этих энергетических уровнях являются неустойчивыми. Электроны, взаимодействуя с фононами, переходят на нижние энергетические уровни, что приводит к уменьшению их эффективной массы, росту подвижности и, следовательно, росту тока. Таким образом, происходят периодические колебания тока.

Чем больше напряженность поля, тем сильнее происходит процесс переброса электронов в верхние энергетические уровни, тем больше сопротивление в данной области полупроводника и тем большее напряжение падает на ней, что приводит к уменьшению поля в соседних областях полупроводника. Как показывают наблюдения, области повышенного сопротивления зарождаются у “катода” и перемещаются к “аноду”. Обычно эффект Ганна наблюдается в тонких образцах и при таких полях, при которых дрейфовая скорость носителей заряда становится сравнимой с тепловой скоростью.

Для прессованных конгломератов зерен полупроводников (например SiC) отступление от закона Ома в сильных полях обусловлено явлениями,

происходящими на контактах зазоров между кристаллическими зёрнами и поверхностью кристаллов: автоэлектронная эмиссия из острых зубцов и граней кристаллических зёрен, покрытых окисью; микронагрев контактирующих точек между кристаллическими зёрнами; поверхностная проводимость.

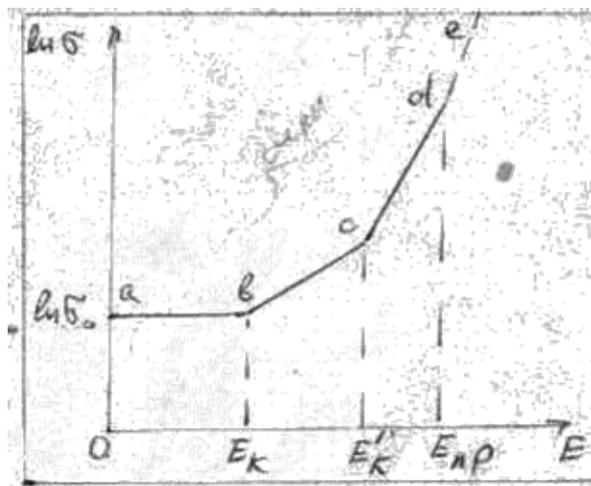


Рис. 2. Зависимость электропроводности полупроводников от напряженности электрического поля.

Типичная кривая зависимости электропроводности полупроводников от напряженности электрического поля приведена на рис. 2. На нем можно четко различить область слабых полей a b, когда $\vec{E} < \vec{E}_k$ и область сильных полей b c d e при $\vec{E} > \vec{E}_k$. В слабых полях $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$. В более сильных полях σ возрастает либо по эмпирическому закону Пуля (при сравнительно слабых полях \vec{E})

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha(E-E_k)} \quad (10)$$

(α – некоторый коэффициент, зависящий от температуры), либо по закону Френкеля (при более сильных полях \vec{E})

$$\sigma = \sigma_0 e^{\beta\sqrt{E}} \quad (11)$$

Участок c d соответствует электростатической ионизации, а за ним следует пробой (участок d e).

2. Основные характеристики варистора. Полупроводниковый прибор, действие которого основано на использовании зависимости электропроводности (сопротивления) полупроводника от напряженности электрического поля,

называется варистором. В качестве материала для изготовления варисторов используется карбид кремния (СН1) и селен (СН2).

Варисторы представляют собой нелинейные полупроводниковые сопротивления (резисторы). Они получили широкое практическое применение в технике: защита элементов маломощной и низковольтной аппаратуры от перенапряжений, стабилизации напряжения, преобразования частот и др.

Область применения варистора определяется его свойствами и параметрами: вольтамперной и температурной характеристиками, коэффициентом нелинейности β , температурным коэффициентом изменения тока δ , температурным коэффициентом сопротивления α и др.

1. Для низковольтных варисторов (от 3 до 200 В) в широком интервале температур выражение для вольтамперной характеристики (зависимости тока от напряжения) имеет следующий вид:

$$J = \sigma_0 U e^{b\sqrt{U} - \frac{\Delta E}{kT}}. \quad (12)$$

где σ_0 – электропроводность в слабых полях, b – постоянная нелинейности, U – приложенное напряжение, ΔE – средняя энергия активации материала варистора (ширина запретного барьера).

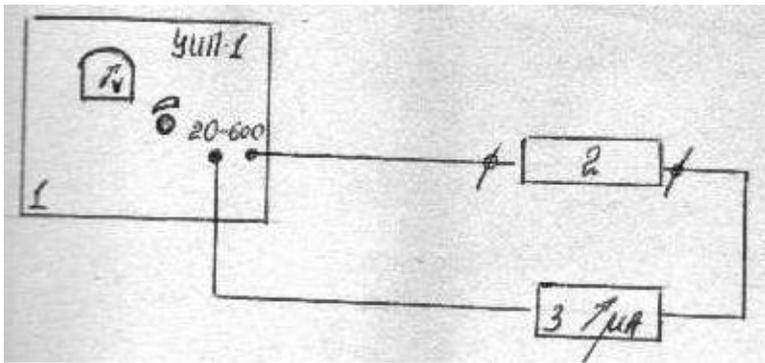
Для снятия вольтамперной характеристики варистора на постоянном токе (рис. 3), изменяя напряжение, подаваемое на варистор находят зависимость тока от напряжения. Затем строят график зависимости $I = f(U)_{T = \text{const}}$ и вычисляют:

статическое сопротивление – сопротивление варистора постоянному току

$$R_{cm} = \frac{U}{I} \quad (13)$$

динамическое сопротивление – сопротивление варистора изменению тока

$$R_{din} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (14)$$



1. Источник питания
2. Варистор
3. Миллиамперметр

Рис. 3. Принципиальная схема для снятия статических вольтамперных характеристик варистора.

2. Коэффициент нелинейности варистора, величина, показывающая во сколько раз статическое сопротивление в одной и той же рабочей точке больше динамического сопротивления:

$$\beta = \frac{R_{ст}}{R_{дин}} \quad (15)$$

Если $\beta = \text{const}$ в некотором интервале приложенных напряжений, то для вольтамперной характеристики варистора можно написать уравнение, справедливое для узкого диапазона токов и напряжений:

$$I = AU^\beta \quad (16)$$

где A – постоянная величина.

В этом случае коэффициент нелинейности

$$\beta = \frac{\ln \frac{I_2}{I_1}}{\ln \frac{U_2}{U_1}} \quad (17)$$

Коэффициенты нелинейности варисторов обычно являются функциями приложенного напряжения и связаны с постоянной нелинейности формулой

$$\beta = 1 + \frac{b\sqrt{U}}{2} \quad (18)$$

Мощность, рассеиваемая варистором, может быть определена из уравнений

$$P = CI^{a+1} \quad (19)$$

$$P = AU^{\beta+1} \quad (20)$$

где $C = A^{-\alpha}$, $\alpha = 1/\beta$.

В случае последовательного соединения нескольких одинаковых варисторов вольтамперная характеристика цепи будет иметь вид

$$U = nCI^\alpha \quad (21)$$

где n – число последовательно соединенных варисторов, имеющих одинаковые значения коэффициентов нелинейности.

При параллельном соединении варисторов вольтамперная характеристика может быть представлена уравнением

$$U = C\left(\frac{1}{n}\right)^\alpha \quad (22)$$

где n – число варисторов, соединенных параллельно.

Величина рабочего напряжения и тока варистора выбирается, исходя из допустимой мощности рассеяния и предельно допустимого значения амплитуды напряжения.

Для оценки влияния температуры окружающей среды на характеристики варистора пользуются температурным коэффициентом изменения тока δ

$$\delta = \frac{\Delta I}{I\Delta T} \quad (23)$$

где ΔI , I , ΔT вычисляются по экспериментальным данным, полученным при снятии статических вольтамперных характеристик при различных температурах.

3. Исследования маломощных карбидокремниевых сопротивлений в достаточно широком диапазоне значения напряжения показали, что электропроводность их в зависимости от напряжения изменяется по закону

$$\sigma = \sigma_0 e^{b\sqrt{U}} \quad (24)$$

где σ_0 – электропроводность в слабых полях, b – постоянный коэффициент.

Для нахождения зависимости $\sigma = f(U)$ или $\ln \sigma = f(\sqrt{U})_{T=const}$ по экспериментальным данным, полученным при исследовании статических вольтамперных характеристик, вычисляют электропроводность σ при различных приложенных напряжениях к варистору.

Зависимость сопротивления и электропроводности полупроводникового материала варистора от температуры выражается формулами

$$R = R_0 e^{\frac{B}{T}} \quad (25)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \quad (26)$$

где

$$B = \frac{\Delta E}{k} \quad (27)$$

Для нахождения зависимости $\sigma = f(U)$ или $\ln \sigma = f(\sqrt{U})_{T=const}$ по экспериментальным данным, полученным при исследовании статических вольтамперных характеристик, вычисляют электропроводность σ при различных температурах и малых, но одинаковых напряжениях, приложенных к варистору. Можно измерить R варистора методом моста при различных температурах, а затем вычислить σ .

ЗАДАНИЕ.

1. Снимите статические вольтамперные характеристики варистора при комнатной температуре. Измерения тока проводите через каждые 10 – 20 В.
2. Вычислите проводимость материала варистора при различных приложенных напряжениях.
3. Постройте вольтамперную характеристику $I = f(U)$; графики зависимости $\ln \sigma = f(E)$ и $\ln \sigma = f(\sqrt{U})$ для исследуемого варистора при данной температуре. По графику $\ln \sigma = f(E)$ определите значение критической напряженности поля E_k .
4. Вычислите статическое и динамическое сопротивление, коэффициент нелинейности для исследуемого варистора в рабочей точке.

ВОПРОСЫ.

1. Какие электрические поля называются сильными?
2. Объясните влияние напряженности электрического поля на подвижность и концентрацию носителей заряда в полупроводниках.
3. Объясните эффект Ганна в полупроводниках.

4. Какой физический смысл параметров β , δ , α варисторов.
5. Приведите примеры применения варисторов в технике.
6. Расскажите о порядке измерения.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Стельбанс Л.С. Физика полупроводников. М., «Энергия», 1971.
2. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. М., «Сов. радио», 1971.
3. Паспиков В.В. и др. Полупроводниковые приборы. М., «Высшая школа», 1966.
4. Городецкий А.Ф., Кравченко А.Ф. Полупроводниковые приборы. М., «Высшая школа», 1967.

В работе используется варистор, изготовленный на основе карбида кремния типа СН1-1-1. Конструктивное оформление – металлизированные с торцов цилиндры.

Размеры: диаметр (мм) – 8,6; длина (мм) – 19