

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ p-Ag₂Te

Ф.Ф.АЛНОВ

Институт Физики АН Азербайджана
Баку-143, пр.Г.Джавида, 33

Проведен анализ электропроводности (σ) в p-Ag₂Te при низких температурах. Показано, что плато в σ (T) до 40 К обусловливается постоянством концентрации и подвижности дырок, а минимум связан с уменьшением подвижности электронов и дырок при $T \sim 65$ К и увеличением концентрации электронов за счет испарения из акцепторного уровня и генерации из валентной зоны в зону проводимости при $T > 65$ К. Показано, что значительное уменьшение подвижности электронов в области температур 50-65 К обусловлено рассеянием электронов на акустических колебаниях решетки и резонансным рассеянием на акцепторных уровнях.

Теллурид серебра относится к узкозонным полупроводникам, которые обладают высокой подвижностью носителей тока и малой теплопроводностью. Поэтому изучение их электрофизических свойств открывает богатые перспективы их практического использования. В связи с этим изучение электропроводности в p-Ag₂Te при низких температурах представляет особый интерес.

У p-Ag₂Te при низких температурах наблюдаются две особенности температурной зависимости электропроводности - σ (T): плато до $T \sim 40$ К и минимум при ~ 65 К (рис.1).

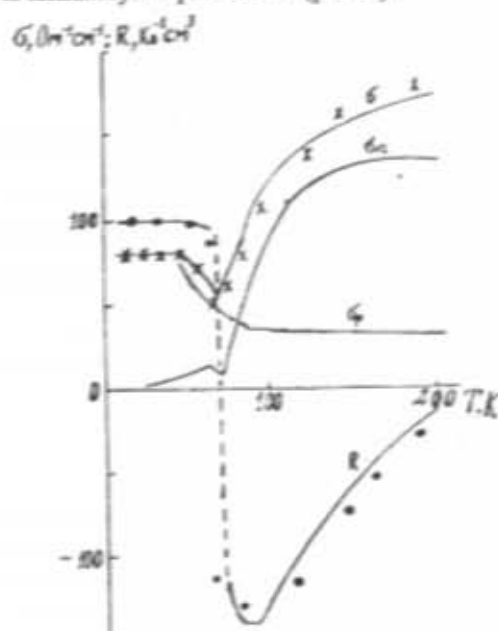


Рис.1. Температурные зависимости электропроводности (σ - общая, σ_e - электронная и σ_p - дырочная) и коэффициента Холла R в p-Ag₂Te.

Как известно, общая проводимость, обусловлена (в данном случае) суммой электропроводностей двух типов носителей тока, электронов $\sigma_e = enU_e$ и дырок $\sigma_p = epU_p$. При низких температурах ($4-40$ К) проводимость в p-Ag₂Te

полностью обусловлена дырками, т.е. при $T < 40$ К концентрация дырок очень велика по сравнению с концентрацией электронов, подвижности электронов при этом на порядок больше подвижности дырок, поэтому $pU_p \gg nU_e$. При $T > 40$ К изменяются концентрации электронов и подвижности обоих носителей тока с температурой. Поэтому достигаемый минимум σ (T) требует анализов $n(T)$, $U_e(T)$ и $U_p(T)$.

Подвижность дырок U_p при $T < 40$ К почти не зависит от температуры, т.е. дырки при низких температурах рассеиваются на ионах зирванных примесей [1,2], а после $T \sim 40$ К рассеяние происходит на акустических колебаниях решетки, благодаря чему уменьшается U_p с температурой, в результате уменьшается σ (T) примерно на 7%. Из рис.1 видно, что σ (T) при ~ 65 К уменьшается примерно на 12%, т.е. остальное уменьшение σ (T) происходит за счет уменьшения U_e в области температур 50-65 К. А возрастание σ (T) при $T > 65$ К обусловлено возрастанием концентрации электронов с температурой.

Для анализов $n(T)$, $U_e(T)$ необходимо знать энергию активации акцепторов (ϵ_a) и температурную зависимость уровня Ферми в целом. Малое значение ширины запрещенной зоны ($\epsilon_{zp} = 0,035$ эВ и $\alpha = \frac{\partial \epsilon_{zp}}{\partial T} = -7 \cdot 10^{-5}$ эВ·К⁻¹) [3] и высокие значения концентрации акцепторов N_a не дают возможность определить значение ϵ_a для p-Ag₂Te. Для определения ϵ_a можно поступить следующим образом: как известно, термоэдс (α_p) для любой степени вырождения дырочного газа и стандартной зоны определяется следующим образом:

$$\alpha_p = -\frac{k}{e} \left[\frac{F_{r,2}(\mu_p^*)}{F_{r,1}(\mu_p^*)} - \mu_p^* \right] \quad (1)$$

где, $\mu_p^* = \mu_p / kT$ приведенный химпотенциал, μ_p - уровень Ферми. Из формулы (1) определен μ_p

при температуре $T \approx 20$ К. Зная значения μ_F можно найти величину ϵ_a из следующей формулы:

$$\mu_F = -\frac{1}{2}(\epsilon_g - \epsilon_a) - \frac{KT}{2} \ln \left[\frac{8\pi^{3/2} h^3 N_a}{(2\mu_F KT)^{3/2}} \right] \quad (2)$$

При значениях $N_a = 6,2510^{16}$ см⁻³, $\mu_F^* = 0,12$ мэ и $T \approx 20$ получено, что $\epsilon_a = 0,030$ эВ (отчет от дна зоны проводимости). Если известны значения ϵ_a и μ_F тогда можно определить концентрацию электронов на акцепторном уровне

$$n_a = N_a \left[1 + \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{\epsilon_a + \mu_F}{KT} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

Расчет показывает, что при $T < 65$ К когда при низких температурах σ остается постоянной, энергия Ферми несколько меньше основного состояния акцептора $\Delta \epsilon_a = \epsilon_g - \epsilon_a$. При дальнейшем росте температуры ($KT > \Delta \epsilon_a$) число свободных мест на акцепторах истощается, т.е. начинается испарение акцепторных электронов по закону $n_a \sim T^{1.5}$, в то же время начинается процесс возбуждения электронов из валентной зоны в зону проводимости, в результате увеличивается концентрация зонных электронов - наступает собственная проводимость. За счет n_a и n увеличивается общая концентрация электронов ($n = n_a + n$) по закону $n \sim T^{2.7}$.

Из вышесказанного видно, что при низких температурах идут два конкурирующих процесса: тепловой заброс свободных электронов на акцепторные уровни и тепловая генерация электронно-дырочных пар. При $T < 65$ К доминирует первый процесс, а при $T > 65$ К - второй.

Теперь перейдем к анализу температурных зависимостей подвижности электронов и дырок. Они проводятся следующим образом:

1. Определяются значение "b" (где $b = U_d/U_p$) по данным максимального значения коэффициента Холла -R (рис.1).

$$R_{max} = \frac{(1-b)^2}{4bcN_a} \quad (4)$$

где cN_a можно вычислить по начальной части кривой зависимости $R(T)$ в которой R не зависит от температуры. Поскольку "b" зависит от T, полученные значение "b" справедливы только для температуры, где R max. В остальной области температур "b" можно выбирать так, чтобы вычисленные значения R по ниже следующей формуле совпадали с экспериментальным:

$$R = \frac{1}{eN_a} \frac{(1-c)(1-b^2c)}{(1+bc)^2} \quad (5)$$

где $c = n/p$. Потом с помощью "b" подобраны значения U_c в формуле:

$$\sigma = cN_a U_c \frac{1+bc}{b(1-c)} \quad (6)$$

где расчетные значение σ совпадает с экспериментальными (рис.1) А подвижность дырок определена как $U_p = R\sigma$ до $T < 40$ К, а выше ~ 40 К $U_p = U_d/b$ (рис.2).

2. Как отмечалось в работе [4], при сильном вырождении и кейновском законе дисперсии при рассеянии на ионизированных примесях и на акустических колебаниях решетки подвижности носителей тока выражается следующими формулами:

$$U_{min} = \frac{3\pi h^3 \epsilon^2}{2cm_0^*} \cdot \frac{1}{f_{воз}} \quad (7)$$

$$U_{ak} = \left(\frac{\pi}{3} \right)^{1/3} \frac{cpU_d^2 h^3 n^{-1/3}}{E^2 KT m_0^*} \quad (8)$$

где, f - фактор, учитывающий влияние непараболичности на вероятность рассеяния, который изучен для n- Ag₂Te в работе [4], ρ - плотность кристалла, U_L - скорость звука в кристалле, E - постоянная деформационного потенциала и ϵ - диэлектрическая постоянная. Значение ρ , U_L , ϵ взяты из [5]. Результаты для U_c приведены в виде графика на рис.2.

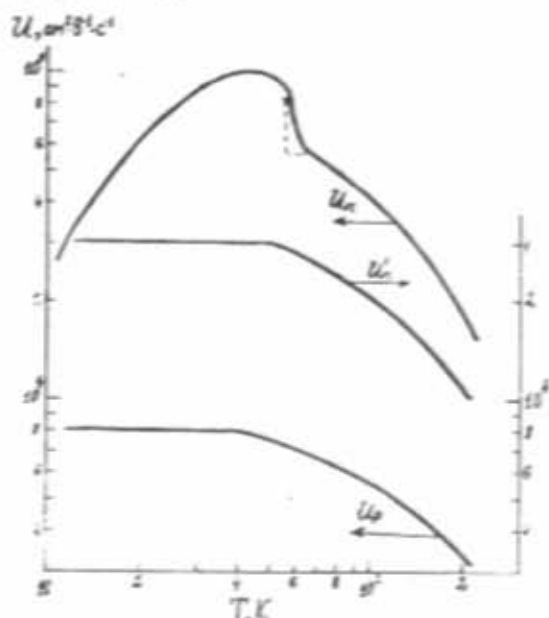


Рис.2. Температурные зависимости подвижности электронов (U_c - полужэкспериментальная, U_c по формуле (7) и (8)) и U_p - дырок.

По данным ρ , n , U_c и U_p вычислены парциальные электропроводности (рис.1). Как видно, из рис.1 при $T < 40$ К σ_p не зависит от T, а после ~ 40 К с ростом T уменьшается U_p , что приводит к уменьшению $\sigma_p(T)$.

Особый интерес представляет зависимость $\sigma_c(T)$. Как видно, из рис.1 $\sigma_c(T)$ сначала увеличивается незначительно, затем начиная \sim

30 К растет значительно, и при ~ 65 К проходит через минимум. Причина минимума $\sigma_c(T)$ может быть связана со следующим обстоятельством: при $T < 65$ К $U_c(T)$ увеличивается до ~40 К, затем в области температур 50÷65 К сильно падает (примерно в 2 раза). В отличие от $U_c(T)$, расчетная кривая $U_c(T)$ до температуры 50 К не зависит от температуры, после 50 К падает примерно по закону $U_c \sim T^{-2}$. Вопрос теперь сводится к выяснению причины аномального изменения U_c с ростом температуры: при низких температурах электроны рассеиваются на акцепторных примесях, когда средняя тепловая энергия много меньше энергии акцепторного уровня $\Delta_{\text{ак}}$. С ростом температуры возрастает захват электронов на акцепторы, что приводит к уменьшению зонных электронов и увеличению U_c при $T < 40$ К. А уменьшение $U_c(T)$ после ~40 К связано с рассеянием электронов на акустических колебаниях. Сильное падение $U_c(T)$ в области

температур 50÷65 К обусловлено рассеянием электронов на акустических колебаниях решетки и резонансным рассеянием электронов на акустических фононах и резонансным рассеянием на акцепторных уровнях (дополнительное рассеяние), когда уровень Ферми расположен в узкой окрестности вблизи $\Delta_{\text{ак}}$.

Таким образом минимум $\sigma_c(T)$ обусловлена сильным уменьшением в области температур 50÷65 К и возрастанием концентрации электронов при $T < 65$ К.

Из вышесказанного о температурных зависимостях концентрации и подвижности электронов и дырок можно сделать вывод о минимуме $\sigma(T)$, т.е. минимум $\sigma(T)$ обуславливается уменьшением подвижности электронов и дырок при $T < 65$ К и увеличением концентрации зонных электронов n в результате испарения из акцепторного уровня и генерации из валентной зоны в зону проводимости при $T < 65$ К.

ЛИТЕРАТУРА

1. С.А. Алиев, Ф.Ф.Алиев. Изв. АН СССР, "Неорганические материалы", 1988, т.24, № 2, с.341-343.
2. С.А. Алиев, Ф.Ф.Алиев, С.Г.Абдинова, З.С.Гасанов, Д.М.Рагимова. Физика. Изв. Вузов, 1990, № 6, с.41-45.
3. С.А. Алиев, Ф.Ф.Алиев, С.А.Зейналов, Н.А.Вердиева. Известия АН Азерб. Респуб., 1993, № 3, с. 53-59.
4. С.А. Алиев, У.Х.Суюнов, М.И.Алиев, ФТП, 1973, т.7, в.10, с.2024-2027.
5. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ. Справочник, М.: Наука, 1979. -399с.

F.F.ƏLİYEV

p-Ag₂Te KRİSTALININ ELEKTRİKKEÇİRMƏSİNİN AŞAĞI TEMPERATURLARDAKI XÜSUSİYYƏTLƏRİ

Məqalədə aşağı temperaturalarda p-Ag₂Te kristalının elektrik keçiriciliyi (σ) tədqiq olunmuşdur. Elektrik keçiriciliyin temperatur asılılığında özünəməxsus iki xüsusiyyət aşkar olunmuşdur ki, - ~40 K qədər σ temperaturdan asılı deyildir ki, bu akseptorların konsentrasiyasının sabitliyi və dəşiklərin ion aşkarlarından səpilməsi ilə, ~ 65 K-də isə minimumdan keçir ki, o isə $T < 65$ K qədər elektronların və dəşiklərin yüüklüyünün azalması və $T > 65$ K isə zona elektronlarının akseptor səviyyəsindən buxarlanması və valent zonasından generasiyası hesabına artması ilə əlaqədardır. Elektronların yüüklüyünün azalması isə onların qəfəsin akustik rəqslərindən və rezonans nəticəsində akseptor səviyyəsindən səpilməsi ilə əlaqədardır.

F.F. ALIYEV

LOW TEMPERATURE PECULIARITIES OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF p-Ag₂Te

These analysis of electrical conductivity (σ) in p-Ag₂Te at low temperatures was made. It is shown that the plateau in $\sigma(T)$ up to ~ 40 K is due to concentration constancy and hole mobilities cohibe the minimum is related to electron and holes mobilities decrease at $T \approx 65$ K, and to increase of concentrations related to evaporation from acceptor levels and generation from valent band into conduction band at $T = 65$ K/ It is shown that significant decrease of electron mobility in temperature range 50÷65 K is due to electron scattering on acoustic oscillations of lattice and by resonante scattering on acceptor levels.