

ОБ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В ДВУМЕРНОЙ СРЕДЕ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Б.М.Вул, Э.И.Заварицкая, В.Н.Заварицкий

Изучена электропроводность σ_{\square} поверхности (111) скола германия в интервале температур T от 1,2 до 4,2К. Установлено, что при $\sigma_{\square} \lesssim (e^2/h)$ поверхностная электропроводность σ_{\square} изменяется как $\exp(-\epsilon/kT)$, где e — заряд электрона, h — постоянная Планка, ϵ — энергия активации. При $\sigma_{\square} \gtrsim (e^2/h)$ с понижением температуры от $T_1 = 4,2\text{К}$ до 1,2К изменение электропроводности $\Delta\sigma = \sigma_{\square}(T_1) - \sigma_{\square}(T) \simeq (e^2/4h)\ln(T_1/T)$. В переходной области зависимость $\sigma_{\square}(T)$ достаточно хорошо согласуется с обеими закономерностями.

Исследование двумерной электропроводности при низких температурах привлекло в последнее время большое внимание. Опубликованный в апреле этого года обзор работ об электронных свойствах двумерных систем включает более 2000 статей¹. Особое внимание уделяют вопросу о характере перехода металл — диэлектрик, которому посвящено значительное число теоретических исследований и экспериментальных работ на МДП структурах и в тонких металлических слоях.

В данной статье приведены результаты исследования электропроводности в двумерной системе, образуемой у поверхности (111) скола монокристаллов германия. Исходные кристаллы были n -типа с удельным сопротивлением при комнатной температуре $20 \div 40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Свежие поверхности были получены расколом кристаллов в жидком гелии и сохранялись в нем до десяти суток, что было достаточно для проведения всего комплекса исследований на каждом из образцов.

Непосредственно после раскола кристаллов в жидком гелии поверхностная электропроводность была столь мала, что не обнаруживалась на фоне объемного сопротивления порядка $10^8 \div 10^9 \text{ Ом}$. Изменение свойств поверхности достигалось посредством промежуточных отжигов в парах гелия при разных температурах и длительностях отогрева². После первого отжига в течение 3 – 5 минут при $T_i \simeq 40\text{К}$ поверхностная электропроводность достигала максимального значения

$$\sigma_{\square} \simeq 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \quad \text{при } T = 4,2\text{К}. \quad (1)$$

Последующие отжиги проводились при $T_i \simeq 85\text{К}$ и приводили к постепенному уменьшению поверхностной проводимости.

Электропроводность σ_{\square} измерялась после каждого отжига на образцах, погруженных в жидкий гелий, при нормальном и пониженном давлении его насыщенных паров, что обеспечивало изменение температуры в интервале от 4,2 до 1,15К. Результаты измерений $\sigma_{\square} = f(1/T)$ приведены на рис. 1. Как видно из этих данных, зависимость σ_{\square} от T в этом интервале температуры имеет вид

$$\sigma_i = A_i \exp\left(-\frac{\epsilon_i}{kT}\right), \quad (2)$$

где i — номер кривой, ϵ_i — величины, аналогичные энергии активации, k — постоянная Больцмана, A_i — определены из экстраполяции прямых $\log \sigma = f(1/T)$ при пересечении с осью ординат.

Зависимость ϵ_i от A_i приведена на рис. 2 и, как видно из полученных данных, с уменьшением электропроводности величина ϵ_i возрастает. Экстраполяция линейной части кривой $\epsilon_i(A_i)$ при значениях $\epsilon_i \geq kT$ до пересечения с осью абсцисс дает величину

$$\sigma_{\square} \simeq \sigma_{min} \simeq e^2/h \simeq 4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1}, \quad (3)$$

где σ_{min} — минимальное значение металлической проводимости.

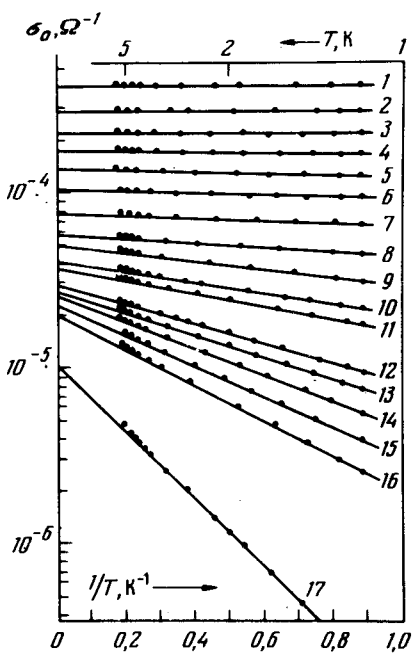


Рис. 1

Рис. 3. Зависимость от температуры величины $\Delta\sigma = \sigma_{\square}(4,2\text{К}) - \sigma_{\square}(T)$ для одного из образцов. Шкала температур дана в логарифмическом масштабе. Штриховыми линиями показаны границы области, в которой укладывается веер прямых, рассчитанных по данным измерений (1 ÷ 15) на рис. 1

То же значение, $\sigma_{\square} \approx \sigma_{min}$, можно получить экстраполяцией на ось абсцисс рис. 2, если по этой оси откладывать значения σ_{\square} , измеренные при любой T в изученном нами интервале температур.

Элементарный расчет дает, что в двумерной среде переход от одного типа электропроводности, "металлической", к другому, "активационной", наступает при величине электропроводности, равной e^2/h и не зависящей от свойств вещества. Однако, как следует из результатов измерений, такой резкий переход не наблюдается, а значение $\sigma_{min} \approx e^2/h$ можно получить только при экстраполяции, как показано на рис. 2.

Зависимость электропроводности от температуры при значениях $\sigma_{\square} > e^2/h$ связывают со "слабой" локализацией, взаимодействием электронов и, независимо от исходных физических предпосылок, приходят к выводу об уменьшении электропроводности с понижением температуры как $\ln T$. Теоретическому исследованию этой зависимости были посвящены многие работы последних лет и их обзор представлен в ¹. В частности, из соотношения (5.10) на стр. 527, приведенного в ¹, следует, что при понижении температуры от T_1 до T двумерная квазиметаллическая электропроводность уменьшается на величину

$$\Delta\sigma = \sigma_{\square}(T_1) - \sigma_{\square}(T) = C \frac{e^2}{\pi^2 \hbar} \ln \frac{T_1}{T}, \quad (4)$$

где коэффициент C — по разному определяется в зависимости от исходных предпосылок ^{3,4}.

По данным приведенным на рис. 1, были определены величины $\Delta\sigma = \sigma_{\square}(4,2\text{К}) - \sigma_{\square}(T)$. Как видно из приведенных на рис. 3 данных, поверхностная электропроводность германия при понижении температуры от 4,2 до 1,15К уменьшается, примерно, на одну и ту же величину

$$\Delta\sigma \approx (1,2 \div 1,3) \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}, \quad (5)$$

независимо от абсолютного значения поверхностной электропроводности при $T = 4,2\text{К}$ в интервале от $40 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5} \Omega^{-1}$.

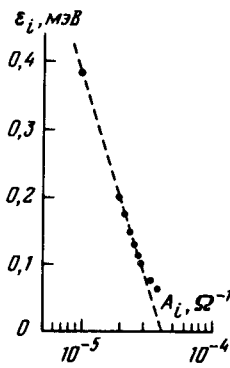


Рис. 2

Рис. 1. Температурная зависимость поверхностной электропроводности σ_{\square} после отжига образцов в парах гелия. Чем выше номер кривой, тем большему числу отжигов подвергался образец

Рис. 2. Зависимость "энергии активации" ϵ_i от предэкспоненциального коэффициента A_i

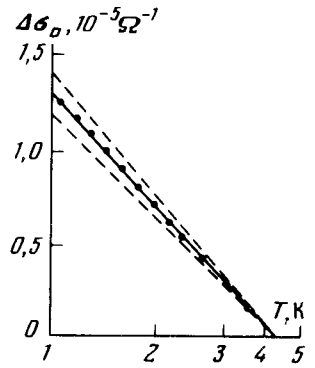


Рис. 3

Изменение $\Delta\sigma$ с температурой соответствует (4) при величине коэффициента $C = 0,37 \pm 0,03$.

Таким образом, в соотношении (4) коэффициент C сохраняет свою величину не только при высоких значениях электропроводности, типа металлической, но и при $\sigma_{\square} (4,2\text{K})$, вдвое меньших σ_{min} .

Из сравнения данных, представленных на рис. 1, рис. 2 и рис. 3 видно, что при $\sigma_{\square} < \sigma_{min}$ электропроводность имеет активационный характер со сравнительно малыми значениями энергии связи ϵ_i , порядка kT . При $\sigma_{\square} > \sigma_{min}$ изменения электропроводности определяются эффектами, рассмотренными в работах ^{3,4}. В промежуточной области значений обе эти закономерности перекрываются. При совпадении разного вида зависимостей σ от T для ограниченного интервала температур выбор между ними должен быть сделан на основе физических представлений. Очевидно, что при $\sigma_{\square} \approx \sigma_{min}$ результаты измерений следует интерпретировать, исходя из теоретических представлений, развитых в работах ^{3,4}.

Выбор условий, в которых были проведены измерения имеет известные преимущества при изучении электропроводности в неупорядоченных средах. В одномерной среде обтекание центров локализации невозможно; в трехмерной — вероятность становится довольно большой и поэтому проведение исследований при достаточно низких температурах в условиях, когда движение можно рассматривать как двумерное, облегчает выявление основных закономерностей электронных явлений. Кроме того, в двумерной среде плотность состояний не зависит от энергии электронов, что упрощает расчеты и вводит, как меру электропроводности величину e^2/h , независимую от свойств среды и определяемую лишь фундаментальными константами.

Авторы выражают благодарность Б.Л.Альтшулеру, А.Г.Аронову, А.И.Ларкину, Д.Е.Хмельницкому за обсуждение результатов работы.

Литература

1. Ando T., Fowler A.B., Stern F. Rev. Mod. Phys., 1982, 54, 437.
2. Вул Б.М., Заварицкая Э.И., Заварицкий В.Н. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 371; 1982, 35, 209.
3. Anderson P.W., Abrahams E., Licciardello D.C., Ramakrishnan T.V. Phys. Rev. Lett., 1979, 42, 673; 1979, 43, 718.
4. Altshuler B.L., Aronov A.G., Lee P.A. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 1288.