

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПОВЕРХНОСТИ СКОЛА ГЕРМАНИЯ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

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

Исследована поверхностная электропроводность на сколах кристаллов германия в жидком гелии, а также в разреженном гелии и в ультравысоком вакууме. Установлено, что переход электронов из валентной зоны на поверхность может происходить при адсорбции примесных атомов, порядка 1% монослоя.

Как было установлено ранее поверхности скола германия в жидком гелии можно перевести из слабо проводящего в состояние с металлической проводимостью путем кратковременного нагрева в парах гелия при $T_i \approx 35$ К [1].

Целью настоящей работы было исследование процессов возникновения, а также исчезновения поверхностной проводимости в германии в зависимости от условий отжига свежесколотых поверхностей.

Отжиг осуществлялся несколькими способами: 1) в парах гелия над жидкостью, как и ранее, в работах [1 — 3], 2) в атмосфере газообразного гелия при давлении от нескольких единиц до нескольких десятков торр в контейнере, как и в работе [4], 3) в вакуумном контейнере, целиком погруженном в жидкий гелий. Все элементы внутри контейнера перед сколом кристалла подвергались предварительному нагреву до температуры, превышающей температуру T_i последующего отжига поверхности скола. Давление в контейнере в этих условиях должно быть меньше 10^{-12} торр [5].

Результаты измерений поверхностной проводимости σ_s при $T = 4,2$ К после промежуточного отжига при температуре T_i в парах гелия приведены на рис. 1. Как видно из приведенных данных в зависимости $\sigma_s =$

$= f(T_i)$ ясно видны три области: I — резкого роста σ_s после отжига при $T_i \approx 35$ К, II — независимости σ_s при $35 \leq T_i \leq 50$ К и монотонного уменьшения σ_s при $50 < T_i < 80$ К, III — резкого уменьшения σ_s при $T_i > 80$ К.

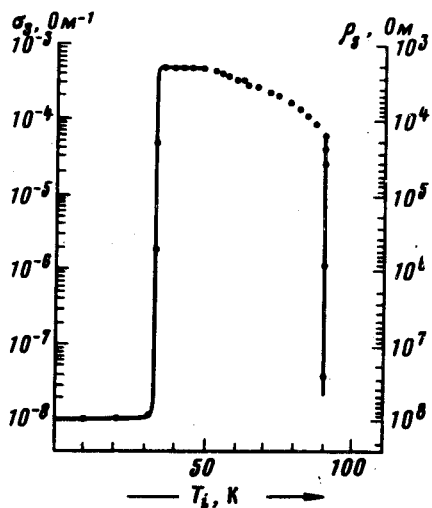


Рис. 1. Зависимость поверхностной электропроводности σ_s при $T = 4,2$ К от температуры промежуточного отжига T_i в парах гелия (каждая точка получена после отогрева в течение 5 минут)

Как видно из рис. 1, после отжига при $T_i \approx 90$ К проводимость почти скачком уменьшается до таких малых значений, которые невозможно различить на фоне объемной проводимости $\sigma \sim 10^{-8}$ Ом $^{-1}$.

Наряду с измерениями удельного поверхностного сопротивления, ρ_s , были проведены также измерения эффекта Холла в интервале $2 \text{ кОм} \leq \rho_s \leq 50 \text{ кОм}$.

Концентрация дырок достигала максимального значения p_m для разных образцов в пределах

$$6 \cdot 10^{12} \leq p_m \leq 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}.$$

В области I, в ходе последовательных отогревов в парах гелия при $T_i \approx 35$ К, удавалось измерить значения $p_s = 0,7 p_m$ при величине удельного сопротивления $\rho_s = (30 + 40) \text{ кОм}$. Результаты измерения зависимости $p_s = f(\rho_s)$ в области II и III приведены на рис. 2. Из сопоставления этих данных, с приведенными на рис. 1, видно, что монотонное уменьшение σ_s в области II определяется, в основном, постепенным уменьшением концентрации свободных дырок, в то время как резкий спад — проводимости σ_s в области III происходит при практически неизменном значении концентрации дырок $p_c = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Результаты измерений $\sigma_s = f(T_i)$ при различных методах отжига представлены на рис. 3. Как видно из приведенных данных, высокая поверхностная проводимость, σ_m , достигается при отжиге в парах гелия при $T_i \approx 35$ К (кривая 1), в разреженном гелии — при $T_i \approx 70$ К (кривая 2), а в глубоком вакууме вплоть до $T_i \sim 120$ К наблюдается лишь незначительное возрастание величины σ_s .

Измерения коэффициента Холла, одновременно с измерениями σ_s , показали, что пологий рост электропроводности σ_s в разреженном газе сопровождается монотонным увеличением концентрации дырок от $2 \cdot 10^{12}$ до σ_m .

Результаты измерений зависимости $\rho_s = f(\rho_s)$, полученные в этом случае, также приведены на рис. 2, и как видно из сопоставления кривых совпадают с полученными ранее, при уменьшении σ_s . Таким образом, независимо от условий отжига и направления процесса изменения проводимости σ_s , зависимости $\rho_s = f(\rho_s)$ одинаковы.

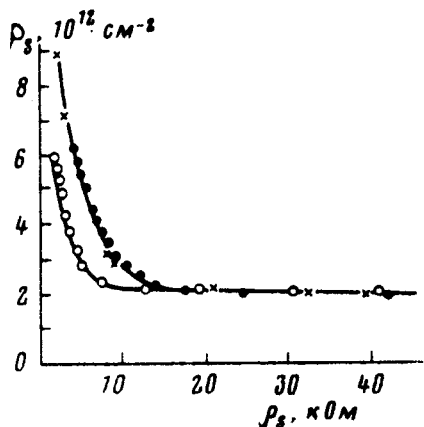


Рис. 1

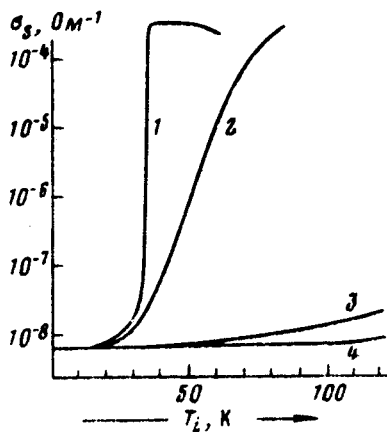


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость поверхностной концентрации дырок от удельного сопротивления ρ_s : \bullet \circ — при возрастании сопротивления, в областях II и III, \times — при уменьшении сопротивления, в области I, в разреженном гелии

Рис. 3. Зависимость $\sigma_s = f(T_i)$, измеренная при $T = 4,2$ К: 1 — после нагрева в парах гелия (давление 1 атм.), 2 — после нагрева в разреженном гелии (давление несколько торр), 3, 4 — после нагрева в вакууме

Из полученных данных следует, что для поверхности германия характерна некоторая критическая концентрация,

$$\rho_c = (2 \pm 0,2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2},$$

выше которой наступает резкое увеличение подвижности дырок, и дырки можно рассматривать, как вырожденный газ.

Представленные на рис. 1 два резких перехода, диэлектрик — металл (в области I) и металл — диэлектрик (в области III), обусловлены существованием этой критической концентрации. Когда концентрация дырок, постепенно возрастая, превышает значение ρ_c , электропроводность резко возрастает; при постепенном уменьшении концентрации дырок электропроводность σ_s плавно уменьшается до тех пор, пока концентрация дырок не упадет до величины ρ_c . При этом свободные дырки превращаются в связанные; электропроводность скачком уменьшается, что и приводит к переходу металл — диэлектрик.

Исследование температурной зависимости поверхностной электропроводности, $\sigma_s = f(1/T)$, в области температур $1,0 \leq T \leq 4,2$ К показало, что минимальная металлическая проводимость составляет величину $\sigma_{min} \approx 4 \cdot 10^{-5}$ Ом⁻¹, в хорошем соответствии с теоретической оценкой этой величины для двумерной модели, $\sigma_{min} = e^2/h$ [6]. Таким образом, описанные переходы из непроводящего состояния в проводящее и обратно являются двумерными переходами металл — диэлектрик.

Из результатов измерений в ультравысоком вакууме следует, что возникновение оборванных связей при сколе кристалла и довольно высоком нагреве, вплоть до 150 К, еще недостаточно для появления поверхностной проводимости. Очевидно, оборванные связи перестраиваются на поверхности, не оставляя уровней для перехода на них электронов из валентной зоны.

С другой стороны, из результатов измерений в парах гелия следует, что после промежуточного нагрева при $T_i \approx 40$ К, становится возможным переход валентных электронов на поверхность и появление свободных дырок вблизи нее. По-видимому, для этого процесса необходима адсорбция на поверхности примесных атомов.

О влиянии самого гелия можно косвенно судить по результатам измерений в разреженном газе. В этих опытах в контейнере содержалось достаточно большое количество гелия, и рост поверхностной электропроводности в зависимости от T_i должен был происходить более круто. Наблюдаемый на опыте медленный рост σ_s , по-видимому, происходит потому, что не собственно атомы гелия, а примеси в нем, которых очень мало, постепенно адсорбируются на поверхности, приводя к небольшому, порядка одного процента монослоя, покрытию поверхности чужеродными атомами.

Таким образом, измерения в гелии при разных давлениях показали, что процесс возникновения поверхностной проводимости на сколах кристаллов германия сложнее, чем предполагалось раньше [3].

Авторы выражают благодарность Н.В.Заварицкому за интерес к работе и полезные дискуссии.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 июля 1981 г.

Литература

- [1] Вул Б.М., Заварицкая Э.И., Сокол Е.Г. Письма в ЖЭТФ, 1979, 30, 517.
- [2] Vul B.M., Zavaritskaya E.I., Ivanchik I.I. Proc. 15th Intern. Conf. Physics Semicond, Kyoto, 1980; J. Phys. Soc. Japan. Suppl A, 1980, 49, 1063.
- [3] Вул Б.М., Заварицкая Э.И., Сокол Е.Г. ЖЭТФ, 1981, 80, 1247.
- [4] Заварицкий В.Н., Заварицкий Н.В., Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 45.
- [5] Герасимов Л.Л., Данилова Н.П., Шальников А.И. ПТЭ, 1964, №4, 155.
- [6] Licciardello D.C., Thouless D.J. Phys. Rev. Lett., 1975, 35, 1475.