

## О МИНИМУМЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ В ДВУМЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Б.М.Вул, Э.И.Заварицкая, Ю.А.Башкиров,  
В.М.Виноградова

Изучена электропроводность проводящих слоев, образующихся на границе бикристаллов германия, в зависимости от угла разориентировки зерен  $7 \leq \theta \leq 30^\circ$ . Обнаружен переход от металлической проводимости к проводимости активационного типа при  $\theta \lesssim 10^\circ$ .

Установлено, что переходу соответствует  $\sigma_{min} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ ом}^{-1}$ , что согласуется теоретической оценкой  $\sigma_{min} \approx e^2/h$  для двумерной системы.

В последние годы резко возрос интерес к свойствам тонких слоев в связи с широким их применением в полупроводниковой микроэлектронике. Тонкие слои можно абстрактно рассматривать как двумерную среду и только сравнение с экспериментом должно показать, сколь правомерной в данных условиях является такая абстракция,

Электропроводность вырожденного электронного газа в двумерной системе

$$\sigma = ne\mu = 2\pi \frac{e^2}{h^2} (pl), \quad (1)$$

где  $n = 2 \frac{\pi p^2}{h^2}$  — концентрация электронов,  $\mu = \frac{el}{mv} = \frac{el}{p}$  — подвижность носителей,  $p$  — импульс электронов на уровне Ферми,  $l$  — длина свободного пробега,  $m$  — эффективная масса.

Если принять, что  $pl > p\Delta l > h/2\pi$

то минимальное значение электропроводности вырожденного электронного газа в двумерной системе

$$\sigma_{min} \approx \frac{e^2}{h} = 3,9 \cdot 10^{-5} (\text{ом})^{-1} \quad (3)$$

и не зависит от вещества [1].

Тонкие слои, имитирующие двумерную систему, можно получать разными методами. В работах [2] такие слои изучались в МДП структурах кремниевых полевых транзисторов. Исследования этих авторов показали, что минимальные значения проводимости зависят от состояния поверхности и для разных образцов изменяются от  $3 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-3} \text{ ом}^{-1}$ .

В нашем случае были изучены тонкие высокопроводящие слои, образующихся на границе зерен бикристаллов, выращенных по методу Чохральского на двойную затравку. Известно, что при этом образуется двумерная сетка краевых дислокаций, расстояние между которыми  $D = \frac{b}{2 \sin \theta/2}$ , где  $b$  – вектор Бюргерса,  $\theta$  – угол разориентации [3]. Дис-

локационная плоскость в германии представляет собой отрицательно заряженную поверхность частично заполненных связей, с примыкающими к ней слоями дырочной проводимости, толщиной несколько десятков ангстрем [4].

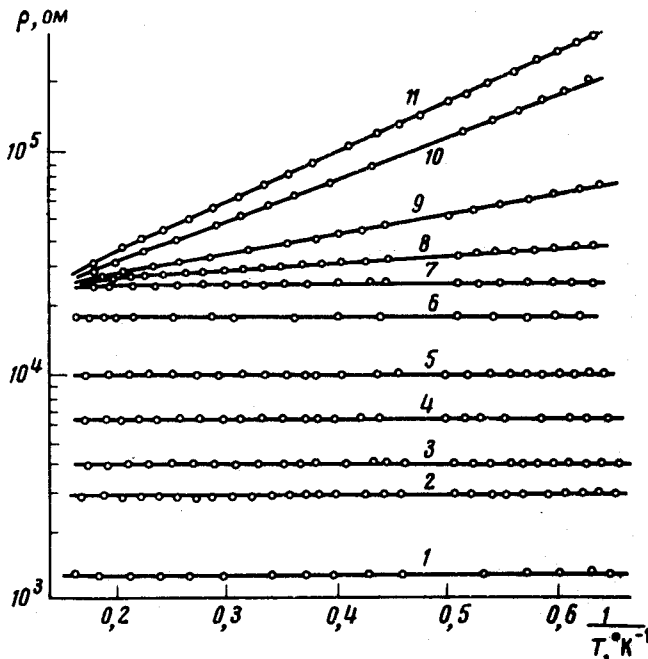


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления образцов с разными углами разориентации  $\theta$

В настоящей работе приведены результаты исследования структур, полученных на основе германия  $n$ - и  $p$ -типов с различной исходной концентрацией электронов и дырок и с разными углами разориентации  $7 < \theta < 30^\circ$  относительно направления [100]. Образцы представляли собой прямоугольники длиной 10 мм, сечением  $1 \times 2 \text{ мм}^2$ , с дислокационными рядами вдоль длинной стороны образца. Контакты изготавливались

из индия; они были омическими для области дислокационной границы, имеющей дырочный тип проводимости, и запирающими для шунтирующих слоев  $n$ -Ge по обе стороны от границы. В области низких температур,  $T < 4\text{K}$ , эта предосторожность была излишней, так как сопротивление прилегающих слоев превышало  $10^9 \text{ом}$ , и их вкладом в проводимость можно было пренебречь.

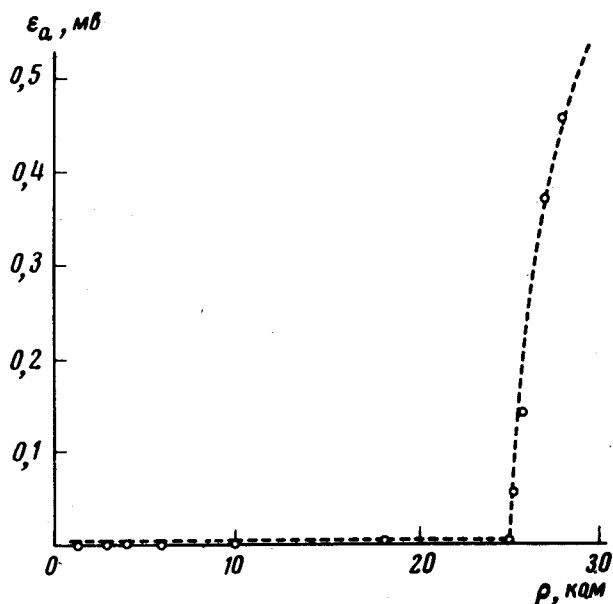


Рис. 2. Зависимость "энергии активации"  $\epsilon_a$  от сопротивления образцов при  $T=6\text{K}$

Зависимость сопротивления от температуры в области  $1,5 \leq T \leq 6\text{K}$  для нескольких изученных образцов приведена на рис. 1. Нижнее семейство прямых (1 ÷ 6) соответствует углам разориентировки  $10 \leq \theta \leq 30^\circ$ , а семейство прямых (7 ÷ 11) соответствует углам  $7 \leq \theta < 10^\circ$ . Как видно из приведенных данных, в области низких температур сопротивление образцов в зависимости от угла разориентировки изменяется от  $1 \text{кОм}$  до  $1 \text{МОм}$ . Образцы с сопротивлением ниже некоторого критического, характеризуются независимостью сопротивления от температуры в области  $T < 10\text{K}$ ; образцы с большим сопротивлением имеют "активационный" характер проводимости. Особенно наглядно этот результат следует из данных, приведенных на рис. 2, где представлена зависимость величины "энергии активации"  $\epsilon_a$  от сопротивления образцов.

Как видно из этих данных, в нашем случае имеет место довольно резкий переход, от температурно независимой электропроводности к зависимой от  $T$ , при величине  $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ом}^{-1}$ . Таким образом экспериментально найденная величина  $\sigma_{min}$  достаточно хорошо совпадает с элементарно рассчитанной согласно (3), и полученные на границе бикристаллов тонкие слои дырочной проводимости в отношении электропроводности можно с достаточно хорошим приближением рассматривать как двумерную среду.

## Литература

- [1] D.C.Licciardello, D.J.Thouless. Phys. Rev. Lett., 35, 1475, 1975.
- [2] D.C.Tsui, S.J.Allen. Phys. Rev. Lett., 32, 1200, 1974; D.C.Tsui, S.J.Allen. Phys. Rev. Lett., 34, 1293, 1975.
- [3] H.Matare. "Defects Electronics in Semiconductors". N.Y.1971; Г. Матаре. Электроника дефектов в полупроводниках. М., изд. Мир. 1974 г.
- [4] G.Landwehr, P.Handler. J. Phys. Chem Solids, 23, 891, 1962; G.Landwehr. Phys. Status Sol., 3, 440, 1963.
-