

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕСЕЙ И ДИСЛОКАЦИЙ В ЛЕГИРОВАННОМ, ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОМ *n*-ГЕРМАНИИ

И.В.Клячкина, М.Л.Кожух, С.М.Рывкин,  
В.А.Трунов, И.С.Шлимак

Обнаружено, что в легированном *n*-Ge по мере его пластической деформации прыжковая проводимость по примесям становится анизотропной и исчезает. Этот эффект интерпретируется как проявление "собирания" примесей на дислокации в процессе деформации и "разрежения" от примесей основного объема кристалла при большой плотности дислокаций.

Целью работы было исследование низкотемпературной проводимости в легированном *n*-Ge, подвергнутому пластической деформации. Методика приготовления образцов аналогична [1], с той разницей, что в качестве исходного материала использовался германий марки ГЭС-01,  $N_{Sb} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

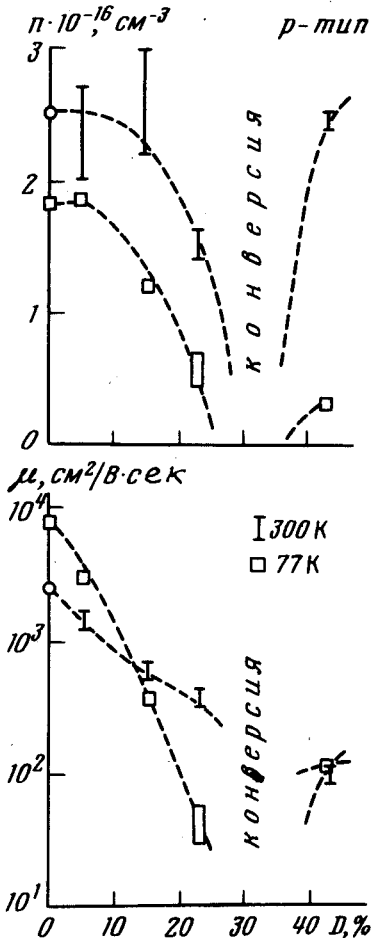


Рис. 1. Влияние пластической деформации на концентрацию свободных носителей в *n*-германии и их подвижность при 300 и 77К

На рис. 1 показана связь между степенью деформации образцов  $D$  и концентрацией в них свободных носителей  $n$ , а также подвижностью  $\mu =$

$= R_x \sigma$  при 300 и 77K ( $R_x$  – коэффициент Холла,  $\sigma$  – проводимость). Видно, что по мере роста  $D$  происходит уменьшение  $n$  и  $\mu$ , и затем конверсия в  $p$ -тип проводимости. Эти результаты качественно согласуются, как будто, с представлениями о том, что дислокационные уровни в Ge имеют, в основном, акцепторную природу и введение их в кристалл  $n$ -типа приводит к компенсации и появлению дополнительного механизма рассеяния [2]. Однако, как будет видно из приведенных ниже данных по низкотемпературной проводимости, основным эффектом при введении дислокаций в легированный германий является пространственное перераспределение примесей. Отметим, что авторы работы [3], изучавшие легированный кремний, подвергнутый пластической деформации, не наблюдали этого явления и пришли к выводу о том, что примеси и дислокации вносят в низкотемпературную проводимость аддитивный вклад.

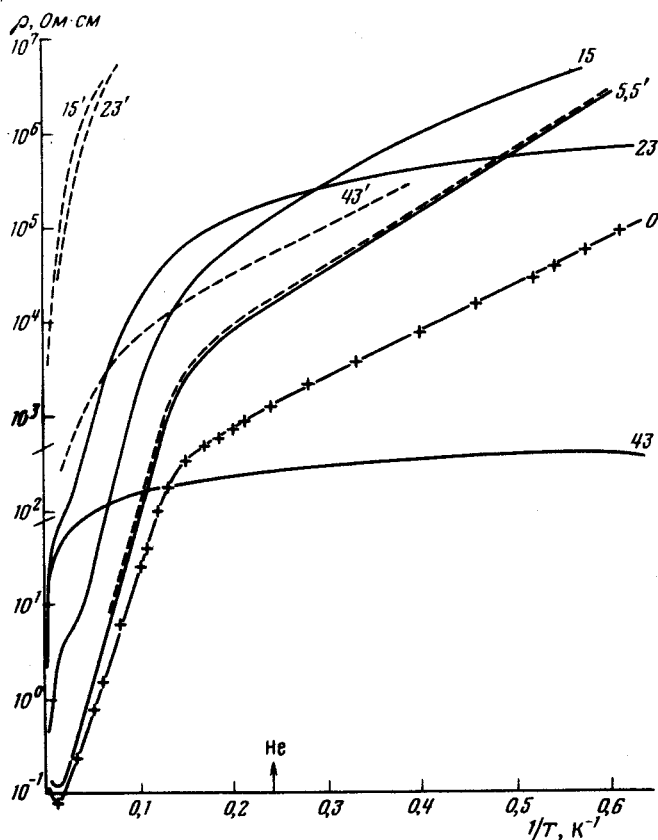


Рис. 2. Низкотемпературная проводимость образцов легированного  $n$ -германия, подвергнутых пластической деформации. Крестики – контрольный образец  $D = 0$ , штриховые линии – проводимость вдоль направления деформации, сплошные линии в плоскости, перпендикулярной этому направлению. Цифры у кривых – величина степени деформации, в %

На рис. 2 приведены кривые низкотемпературной проводимости серии исследованных образцов. Кривая 0 соответствует контрольному образцу, прошедшему такую же температурную обработку, но не дефор-

мированному. Видно, что в области низких температур в этом образце наблюдается прыжковая проводимость (ПП) по примесным атомам сурьмы с постоянной энергией активации  $\epsilon_3$ :  $\rho(T) = \rho_3 \exp(\epsilon_3/kT)$ . Такую температурную зависимость имеет так называемая ПП "по ближайшим соседям", в которой выбор путей "протекания" происходит по всем примесным состояниям, независимо от их энергетического положения [4]. Параметр  $\rho_3$  определяется интегралом перекрытия и экспоненциально сильно зависит от среднего расстояния между примесями  $R \sim N^{1/3}$ . Величина  $\epsilon_3$  равна расстоянию от уровня Ферми до максимума спектра плотности состояний и отражает ширину примесной полосы.

Из рис. 2 можно видеть, что вначале, до конверсии, по мере роста  $D$  ПП уменьшается, причем растет как  $\rho_3$ , так и  $\epsilon_3$ . Это свидетельствует против представлений об обычной компенсации. В самом деле, в этом случае, как известно, с увеличением степени компенсации  $K$  величина ПП увеличивается за счет уменьшения  $\epsilon_3$ , достигает максимума при  $K = 0,5$  и лишь затем начинает уменьшаться. На опыте же мы видим, что для образцов с  $D = 5$  и  $15\%$ , у которых, судя по холловским измерениям,  $K < 0,5$ , ПП заметно уменьшилась. Увеличение  $\epsilon_3$  может свидетельствовать об уширении примесной полосы из-за неоднородной деформации решетки при введении большого числа дислокаций. Однако основным результатом является увеличение параметра  $\rho_3$ , которое показано рисками на оси ординат (рис. 2). Эта величина, как уже отмечалось, зависит от значения параметра  $R/a$ , где  $a$  — боровский радиус электрона на доноре.

Увеличение  $\rho_3$  и наблюдаемую анизотропию ПП в образцах с  $D = 15$  и  $23\%$  можно попытаться объяснить наличием в пластически деформированном германии внутренних упругих напряжений. Известно, например, что при максимально эффективной упругой одноосной деформации вдоль  $\langle 111 \rangle$  донорная волновая функция в  $n$ -Ge становится анизотропной и перекрытие волновых функций в случае примеси сурьмы уменьшается [5]. Однако из данных работы [5] следует, что даже в случае "предельных" упругих напряжений величина  $\rho_3$  для образца с такой же концентрацией сурьмы не превышает  $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , что меньше, чем удельное сопротивление деформированных образцов, особенно вдоль оси деформации. Кроме того, анизотропия ПП, как показано в [6], не должна превышать анизотропии самой волновой функции, которая в Ge  $\approx 4 \div 5$ , что также противоречит опыту — наблюдаемая на рис. 2 анизотропия проводимости превышает два — три порядка.

В этих условиях мы приходим к выводу о том, что в результате пластической деформации увеличивается  $R$ , т. е. уменьшается концентрация примесей, участвующих в прыжковой проводимости, причем уменьшение происходит неравномерно в различных направлениях, что и обуславливает эффект анизотропии. Мы полагаем, что этот эффект обусловлен "собираанием" примесей дислокациями во время пластической деформации. Можно было бы, конечно, предположить, что пространственное распределение примесей не меняется, а благодаря непосредственной близости дислокаций, микротрещин и других дефектов, возникающих при пластической деформации, энергетический уровень у части примесей претерпевает столь сильные изменения, (например, выталкивается "в зону проводимости"), что на таких примесях исчезает лока-

лизованное состояние для электрона. Это способствовало бы эффективному уменьшению концентрации примесей, участвующих в ПП. Однако в этом случае должно было бы наблюдаться соответствующее уменьшение концентрации свободных электронов при температурах, когда электроны с примесей переходят в зону проводимости. На опыте это не так: например, для образца с  $D = 5\%$  увеличение  $\rho_3$  соответствует уменьшению  $N$  в 1,8 раза, в то время, как  $n$  практически не уменьшилась (см. рис. 1). Остается предположить, что имеет место пространственное перераспределение — "собираение" примесей вокруг дислокаций, тогда  $n$  изменится мало, а поскольку прыжковое сопротивление определяется областями разрежения, окружающими дислокации, величина  $\rho_3$  должна резко возрасти.

Явление образования вокруг дислокаций примесных "атмосфер" известно [7]. Эффект "разрежения" основного объема кристалла от примесей, который мы наблюдаем, можно объяснить большой плотностью дислокаций (по оценкам, порядка  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>), когда среднее расстояние между ними мало ( $l_0 \sim 10^{-5}$  см). В этих условиях за время проведения высокотемпературной пластической деформации все примеси могут успеть стянуться к дислокациям, для этого необходимо выполнение условия  $l_D > l_0$ . Здесь  $l_D$  — диффузионная длина пробега примесей ( $l_D = \sqrt{D_{\text{П}} t}$ ,  $D_{\text{П}}$  — коэффициент диффузии при температуре проведения пластической деформации,  $t$  — время деформации). Численные оценки показывают, что это соотношение в нашем случае выполняется.

В [1] при исследовании низкотемпературной проводимости в пластически деформированном, "чистом" от примесей германии была обнаружена анизотропия ПП "по дислокациям" — проводимость в плоскости  $\{111\}$ , перпендикулярной оси деформации, была гораздо лучше, чем в направлении этой оси. Этот факт свидетельствовал о том, что в плоскости  $\{111\}$ , являющейся в Ge плоскостью скольжения, имеются скопления дислокаций и других дефектов. Из рис. 2 видно, что анизотропия ПП по примесям в образцах с  $D = 15$  и  $23\%$  имеет аналогичный характер. Это обстоятельство, с учетом того, что геометрия и другие условия пластической деформации в настоящей работе и в [1] были одинаковыми, можно рассматривать, как еще одно указание на "стягивание" примесей к дислокациям.

Температурная зависимость проводимости наиболее деформированного образца с  $D = 43\%$ , конвертированного в  $p$ -тип, совпадает с аналогичными данными [1], причем это относится к обоим измеренным направлениям. Это позволяет сделать вывод о том, что в этом материале перенос заряда осуществляется с помощью механизма проводимости "по дислокациям", причем наличие примесных "атмосфер" вокруг дислокаций не оказывает на проводимость существенного влияния.

Авторы искренне признательны Ю.А.Осипьяну и участникам семинара лаборатории спектроскопии дефектных структур ИФТТ АН СССР за полезное обсуждение результатов работы.

## Литература

- [1] И.В.Кляцкина, М.Л.Кожух, С.М.Рывкин, В.А.Трунов, И.С.Шлимак. ФТП, 13, №5, 1979.
- [2] Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М., ИИЛ, 1962.
- [3] В.А.Гражулис, В.Ю.Мухина, Ю.А.Осипьян, С.А.Шевченко. ЖЭТФ, 68, 2149, 1975.
- [4] Б.И.Шкловский. ФТП, 6, 1197, 1972.
- [5] Б.И.Шкловский, И.С.Шлимак. ФТП, 6, 129, 1972.
- [6] Б.И.Шкловский. ФТП, 11, 2135, 1977.
- [7] Ж.Фридель. Дислокации. М., изд. Мир, 1967.
-