

Письма в ЖЭТФ, том 13, стр. 153 – 157

5 февраля 1971 г.

АКТИВАЦИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЧТИ ПОЛНОСТЬЮ КОМПЕНСИРОВАННОГО *n*-ГЕРМАНИЯ

И.С.Шлимак, В.В.Емцев

В работе Шкловского и Эфроса [1] показано, что при низких температурах уровень Ферми в компенсированном полупроводнике с приближением степени компенсации $K = N_A/N_D$ к единице, не стремится к постоянному пределу, как это следует из теории Миллера и Абрагамса [2], а неограниченно опускается вглубь запрещенной зоны. Это связано с тем, что оставшиеся на некомпенсированных донорах электроны находятся в самых глубоких местах потенциального рельефа, создаваемого крупномасштабными флуктуациями концентрации заряженных примесей. В настоящей работе исследуется область температур, в которой электропроводность связана с электронами, активиро-

ванными в зону проводимости. Как показано в [1], подвижность электронов в зоне проводимости отлична от нуля, начиная с некоторой энергии, называемой энергией "протекания", причем энергия активация проводимости ϵ_1 , равная разности энергии "протекания" в энергии Ферми, дается выражением

$$\epsilon_1 = \epsilon_B + a \frac{e^2 N_D^{1/3}}{\kappa (1 - K)^{1/3}}. \quad (1)$$

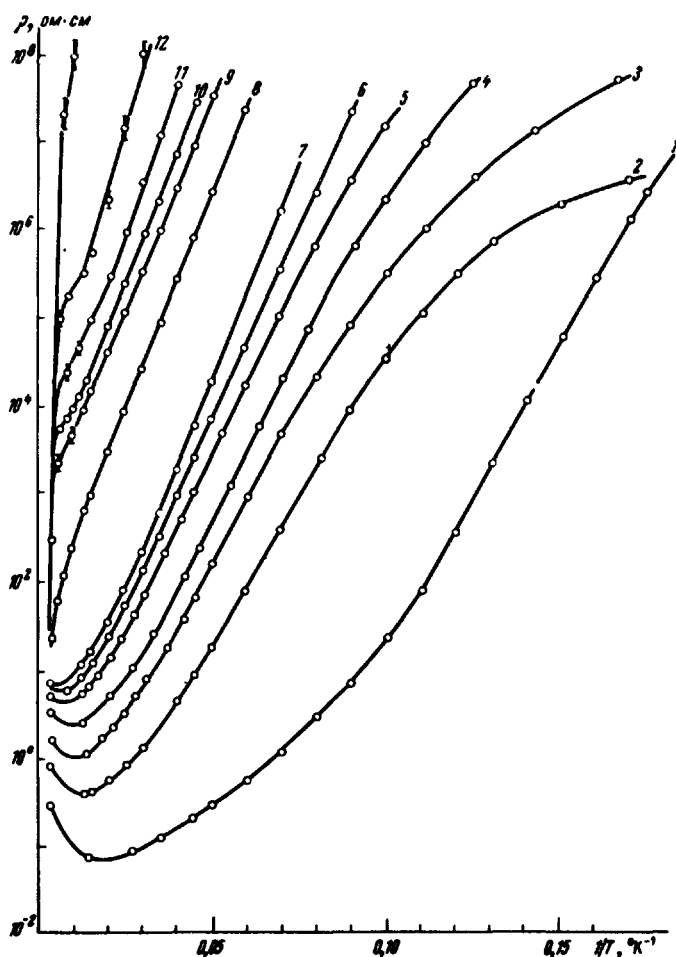


Рис.1. Зависимости удельного сопротивления n -Ge от температуры для разных степеней компенсации: 1 - исходный образец, 2-4 - "химическая" компенсация (облучение медленными нейтронами), 5-12 - дальнейшая компенсация γ -облучением. $1 - K$: 2 - $3,3 \cdot 10^{-1}$; 3 - $1,8 \cdot 10^{-1}$; 4 - $1,06 \cdot 10^{-1}$; 5 - $5,6 \cdot 10^{-2}$; 6 - $4,4 \cdot 10^{-2}$

Здесь ϵ_B - энергия ионизации изолированного донора, κ - диэлектрическая проницаемость, a - численный коэффициент порядка единицы. Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке этого вывода.

Для эксперимента брались образцы n -Ge, легированные мышьяком, с исходной концентрацией, равной в среднем $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и специально не компенсированные. "Химическая" компенсация осуществлялась с помощью ядерных трансмутаций при облучении образцов медленными нейтронами в атомном реакторе. При этом в кристалл равномерно вводились преимущественно акцепторная примесь Ga, а также донорные примеси As и Se в соотношении 30,4:9,8:1,2. Доза облучения контролировалась с помощью "чистого" образца, помещенного рядом с легированным в качестве датчика. Концентрация некомпенсированных доноров определялась по измерению эффекта Холла в интервале 300 – 77°K [3]. Дальнейшее увеличение компенсации полученных сильно компенсированных образцов n -Ge осуществлялось с помощью контролируемого введения μ -акцепторов при облучении на μ -источнике Co^{60} .

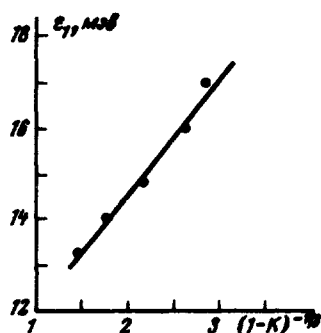


Рис. 2. Зависимость ϵ_1 от степени компенсации

На рис. 1 показаны температурные зависимости удельного сопротивления n -Ge для различных степеней компенсации. Можно видеть, что в области сильной компенсации энергия активации ϵ_1 , определяемая по наибольшему наклону кривой в низкотемпературной области, больше ϵ_B (для As в Ge $\epsilon_B = 12,7 \text{ мэВ}$) и растет с увеличением степени компенсации, достигая величины 28 мэВ для кривой 12. Следует отметить, что определение компенсации при помощи измерения эффекта Холла становится в нашем случае невозможным при $1 - K < 3 \cdot 10^{-2}$ из-за резкого проявления неоднородности образцов. Эти "технологические" неоднородности макроскопического размера обусловлены неравномерным распределением исходных доноров при приготовлении образца. Величина неоднородностей порядка нескольких процентов характерна, по-видимому, для обычных промышленных образцов германия. В результате сильной компенсации оставшиеся электроны сосредотачиваются в местах с избыточной концентрацией доноров. В этих условиях измерения проводимости σ и постоянной Холла R не соответствуют друг другу. На опыте это проявилось в том, что начиная с $1 - K < 10^{-2}$ произведение $R\sigma$ при 77°K стало резко уменьшаться, то есть перестало иметь смысл подвижности. По этой причине проверка соотношения (1) производилась нами только в области однородности образца. На рис. 2 показана зависимость ϵ_1 от $(1 - K)^{-1/3}$. Видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую. Наклон прямой позволил определить коэффициент α в (1), который оказался равным 1,2.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные могут рассматриваться как подтверждение теоретических расчетов, сделанных в [1]. Поиски весьма однородных образцов позволяют, очевидно, провести сравнение теории с экспериментом в области еще больших компенсаций.

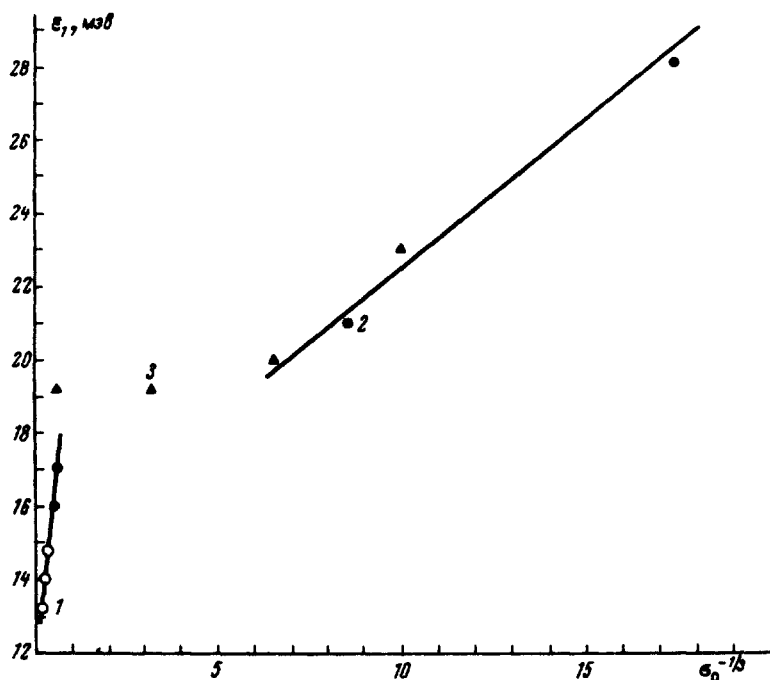


Рис.3. Зависимость ϵ_1 от $\sigma_0^{-1/3}$ в области почти полной компенсации. 1 — "химическая" компенсация, 2 и 3 — введение и отжиг γ -дефектов

В заключение остановимся на предпринятой нами попытке проанализировать (1) в области почти полной компенсации. Как уже отмечалось, в этой области измерение эффекта Холла из-за неоднородного легирования не дают сведений о концентрации электронов в местах, ответственных за проводимость. Эти сведения мы попытались получить из измерений той же проводимости. В духе работы [1] естественно предположить, что подвижность на уровне "протекания" слабо зависит от степени компенсации. Тогда величина проводимости в области истощения примеси σ_0 пропорциональна концентрации электронов n , или $(1 - K)$. Эти данные можно получить либо при экстраполяции низкотемпературного участка, на котором определяется ϵ_1 , на ось ординат, либо по значению проводимости на плато, поскольку обе эти величины пропорциональны n . Второй метод, в случае наличия на кривой проводимости в области высоких температур четкого плато, предпочтительнее, как более точный.

На рис.3 показана зависимость ϵ_1 от $\sigma_0^{-1/3}$. Можно видеть, что вначале, в области относительной однородности, такая обработка результатов также приводит к прямолинейной зависимости с тем же наклоном, что и на рис.2. Наблюдаемое затем отклонение от прямолиней-

ной зависимости связано со значительным сужением проводящего объема образца в области почти полной компенсации. При этом определяемая на опыте величина средней проводимости оказывается существенно меньше ее истинного значения в проводящем канале. Если на какой-либо стадии компенсации сечение канала меняется мало, то зависимость ϵ_1 от $\sigma_0^{-1/3}$ может снова стать прямолинейной, однако с меньшим наклоном, причем отношение наклонов пропорционально кубическому корню из отношения сечений всего образца и проводящего канала. Вероятно, что в исследованном образце такая ситуация имеет место на заключительном этапе компенсации.

Авторы выражают искреннюю признательность проф. С.М.Рывкину, А.Л.Эфросу и Б.М.Шкловскому за обсуждение результатов работы.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 января 1971 г.

Литература

- [1] Б.И.Шкловский, А.Л.Эфрос. ЖЭТФ. **60**, 867, 1971,
 - [2] A.Miller, E.Abrahams. Phys. Rev., **120**, 745, 1960.
 - [3] M.Cuevas. Phys. Rev., **164**, 1021, 1967.
-