

Письма в ЖЭТФ, том 16, вып.7, стр. 374. — 377.

5 октября 1972 г.

БЕЗАКТИВАЦИОННАЯ ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ В КОМПЕНСИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ

А. Н. Ионов, И. С. Шлимак

В области низких температур проводимость легированных полупроводников носит, как известно, прыжковый характер [1, 2], когда перенос заряда осуществляется с помощью туннельного перехода (прыжка)

электрона с занятого на свободный примесный центр, присутствие которых обеспечивается компенсацией. Наличие энергии активации связано с разбросом уровней примесей в хаотических полях заряженных доноров и акцепторов, при этом электрону при движении приходится в среднем с одинаковой частотой поглощать или испускать фотон; необходимость поглощения фотона и приводит к экспоненциальной зависимости проводимости от температуры. Однако в достаточно сильном электрическом поле прыжковая проводимость в принципе может стать безактивационной [3]. Для этого необходимо лишь, чтобы на длине прыжка R перепад потенциальной энергии в электрическом поле eER был сравним с величиной разброса энергии Δ примесных центров. В этом случае прыжки электронов будут происходить лишь с испусканием фотонов, и проводимость перестанет зависеть от температуры. Простые оценки показывают, однако, что в области классической прыжковой проводимости по мелким примесям наблюдать этот эффект невозможно, поскольку в гораздо более слабых полях наступает ударная ионизация примесных центров. Более благоприятные возможности открываются при дальнейшем понижении температуры, когда проводимость обусловлена прыжками электронов не по ближайшим примесям, а по состояниям, находящимся в узкой полосе энергий вблизи уровня Ферми. В этой области проводимость σ убывает с температурой по закону [4]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right)^{1/4}, \quad T_0 \sim \frac{1}{g(\mu)\sigma^3}, \quad (1)$$

где $g(\mu)$ — плотность состояний на уровне Ферми; σ — борковский радиус. Величина критического поля, необходимого для наблюдения безактивационной прыжковой проводимости при этом существенно снижается поскольку с понижением температуры уменьшается Δ и растет R . В сильно легированном и сильно компенсированном германии проводимость типа " $T^{-1/4}$ " (1) наблюдалась в экспериментально удобной области азотно — гелиевых температур [5], кроме того, сильная компенсация приводит к понижению уровня Ферми в глубину запрещенной зоны и повышению поля ударной ионизации. Эти обстоятельства и обусловили выбор объекта исследования. Эксперименты проводились на образцах германия, сильно легированных фосфором ($N_0 \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$) и одновременно сильно компенсированных галлием. Степень компенсации по расчету составляла величину порядка 80%¹⁾.

Образцы вследствие сильной компенсации были неоднородны и коэффициент Холла на них не измерялся. Вольтамперная характеристика образцов была нелинейной и сопровождалась в стационарных условиях пробоем [5]. Применение импульсной методики позволяло избежать пробоя, при этом для исключения тепловых явлений опыты проводились в условиях, когда величина тока не зависела от длительности импульсов и скважности.

¹⁾ Мы искренне благодарны Р.А. Корчажиной за приготовление образцов сильно компенсированного германия.

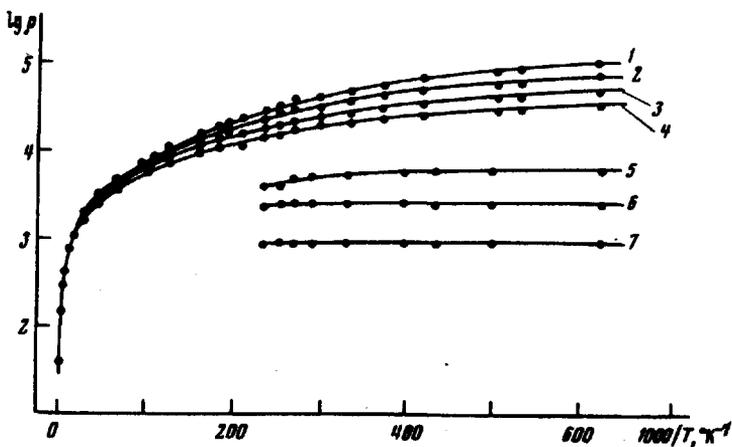


Рис. 1. Температурная зависимость проводимости сильно-компенсированного германия при различных напряженностях электрического поля: 1 - 2 в/см, 2 - 10 в/см, 3 - 30 в/см, 4 - 50 в/см, 5 - 100 в/см, 6 - 200 в/см, 7 - 800 в/см

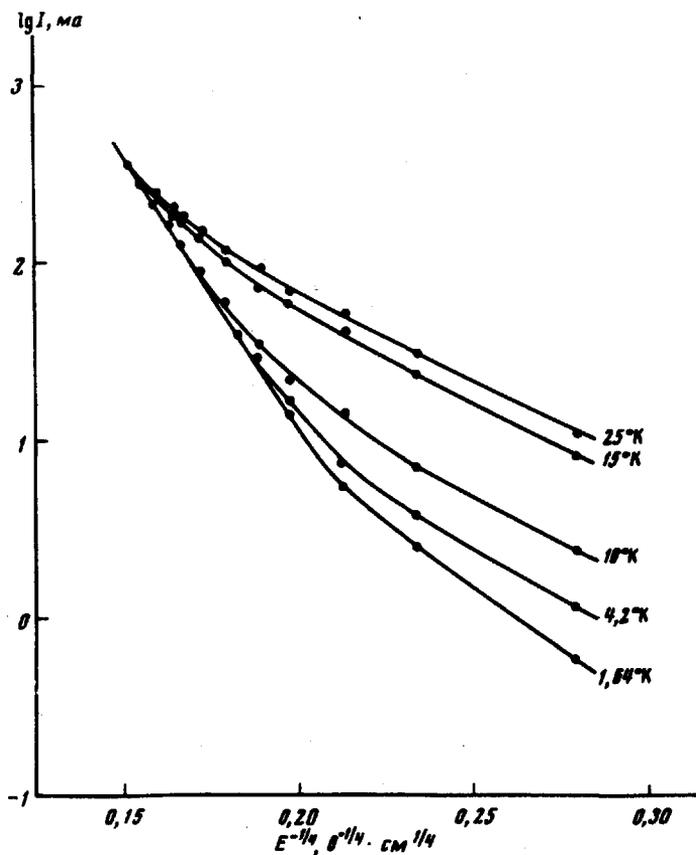


Рис. 2. Зависимость тока от напряженности сильно компенсированного германия при различных температурах

На рис. 1 показаны температурные зависимости проводимости одного из образцов в различных полях. Со стороны самых низких температур отчетливо наблюдается эффект безактивационной прыжковой проводимости, когда проводимость перестает зависеть от температуры, а зависит лишь от величины приложенного поля. Не зависящая от температуры проводимость наблюдалась также в аморфном германии [6], однако в этой работе она объяснялась туннельным переходом носителей в сильном поле из локализованного состояния в разрешенную зону.

В нашем случае экспериментальные данные (относительно слабые поля, удаленность от поля пробоя) позволяют утверждать, что безактивационная проводимость осуществляется локализованными носителями в соответствии с описанной выше моделью, т. е. является по существу прыжковой проводимостью. В этом случае, как показано в [7], зависимость тока проводимости от электрического поля должна иметь вид

$$I(E) \sim \exp\left(-\frac{E_0}{E}\right)^{1/4}, \quad E_0 \approx \frac{T_0}{e\sigma} \quad (2)$$

На рис. 2 показан график зависимостей $\lg I$ от $E^{-1/4}$ для разных температур. Из рисунка можно видеть, что в условиях, когда ток не зависит от температуры, экспериментальные точки удовлетворительно лежат в этом масштабе на прямой, что согласуется с (2).

Таким образом, обнаруженная в германии безактивационная прыжковая проводимость, по-видимому, может, обеспечивать конечное сопротивление легированных полупроводников при $T = 0$.

В заключение авторы выражают благодарность С.М.Рывкину за полезное обсуждение затронутых вопросов, Б.И.Шкловскому за возможность ознакомления с работой [7] до ее опубликования и А.Г.Забродскому за помощь в проведении экспериментов.

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

Поступила в редакцию
10 августа 1972 г.

Литература

- [1] N. F. Mott, W. D. Twose. Adv. Phys., 10, 107, 1961; (перевод УФН, 79, 691, 1963).
- [2] Б.И.Шкловский. ФТП, 6, 1197, 1972.
- [3] N. F. Mott. Phil. Mag., 22, 7, 1970.
- [4] N. F. Mott. Phil. Mag., 19, 835, 1969.
- [5] А.Р.Гаджиев, С.М.Рывкин, И.С.Шлимак. Письма в ЖЭТФ, 15, 605, 1972.
- [6] M. Morgan, P. A. Walley. Phil. Mag., 23, 661, 1971.
- [7] Б.И.Шкловский, ФТП, 6, вып 12, 1972.