

НОВЫЙ ТИП НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТОКА В *n*-ГЕРМАНИИ

А.А.Кастальский, С.М.Рыскин

В работе [1] был произведен расчет вольт-амперной характеристики электронного германия с малой концентрацией мелких донорных состояний для случая действия электрического поля вдоль кристаллографической оси [111]. Оказалось, что при низких температурах опыта на вольт-амперной кривой должен иметь место довольно глубокий участок отрицательного сопротивления. Эффект обусловлен неэквивалентными условиями для различных долин, возникающими при указанном направлении действия поля, с точки зрения разогрева в них электронов и, как следствие этого, разными вероятностями для междолинного перехода.

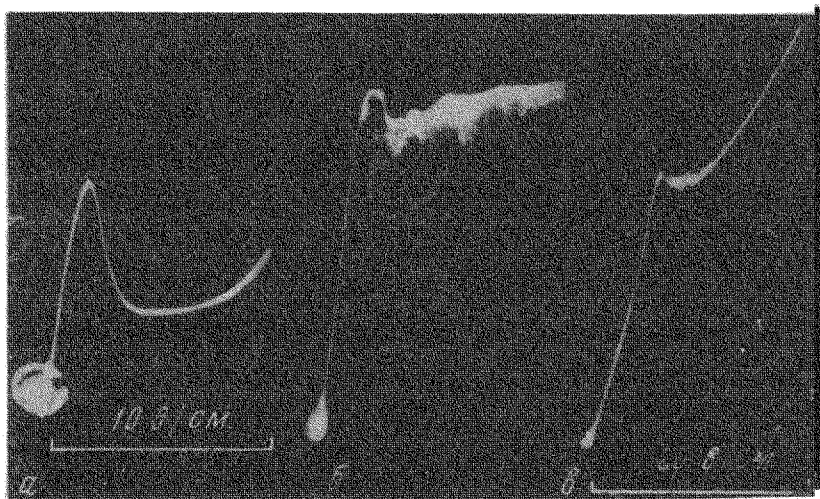


Рис.1. Вольт-амперные характеристики электронного германия с концентрацией мелких доноров $3 \cdot 10$ см при различных температурах: *a* — $T = 4,2^\circ\text{K}$, *b* — $T = 20^\circ\text{K}$, *c* — $T = 30^\circ\text{K}$

Междолинные переходы электронов в германии происходят как за счет генерации или поглощения продольного коротковолнового акустического фонона, так и путем рассеяния на примесях [2]. В случае малой концентрации примесей, способных изменить импульс электрона, процесс междолинных переходов будет определяться фононным рассеянием. При уменьшении температуры вероятность фононных переходов будет экспоненциально спадать как из-за уменьшения числа фононов, необходимых для междолинных перебросов, так и из-за уменьшения числа электронов с энергией, превышающей энергию требуемого фонона.

В этом случае разогрев электронов электрическим полем может значительно усилить междолинные переходы с генерацией фонона.

Однако, при действии поля вдоль оси [111] электроны в долине, вытянутой в этом направлении, будут разогреваться значительно слабее, чем в трех других долинах, "повернутых" малой эффективной массой к направлению действия поля. Поскольку сильно разогретые электроны имеют гораздо большую вероятность междолинного рассеяния с испусканием фонона, чем слабо разогретые, то это влечет за собой увеличение интенсивности переходов из трех "горячих" долин в одну "холодную", где электроны движутся под действием поля с большой эффективной массой.

Возникающая таким образом "диффузия" носителей в k -пространстве вызывает уменьшение тока при увеличении напряжения и тем самым обеспечивает существование участка отрицательного сопротивления на вольт-амперной кривой, что, в свою очередь, приводит к появлению (как и в эффекте Гана) доменно-дрейфовой неустойчивости тока.

Однако, поскольку междолинное примесное рассеяние не столь критично к разогреву электронов и примерно одинаково для всех долин, то оно будет действовать в сторону выравнивания концентраций электронов в долинах.

Таким образом, рассматриваемый эффект отрицательного сопротивления может возникнуть лишь при низкой температуре решетки и малой концентрации примесей (и электронов, так как электрон-электронное взаимодействие будет выравнивать "температуры" носителей в долинах).

Расчет эффекта в условиях концентрации мелких доноров, равной $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, был выполнен для температуры 20°K , поскольку при этой температуре подавляющая часть электронов термически ионизована в зону проводимости, тогда как при меньшей температуре электроны будут захвачены донорными центрами и на исследуемый эффект будет накладываться процесс примесного пробоя. Кроме того, оказалось, что при $T = 40^\circ \text{K}$ падающий участок на расчетной вольт-амперной кривой отсутствовал.

Следует отметить, что большая глубина возникающего отрицательного участка при $T = 20^\circ \text{K}$ позволяет исследовать это явление и в условиях постоянной подсветки (т.е. при наличии дырочной компоненты проводимости). В этом случае можно проводить эксперимент при меньшей температуре (например при $4,2^\circ \text{K}$) и на образцах как n -, так и p -типа.

При этом, однако, необходимо, чтобы фотопроводимость электронов была бы по крайней мере не меньше, чем фотопроводимость дырок.

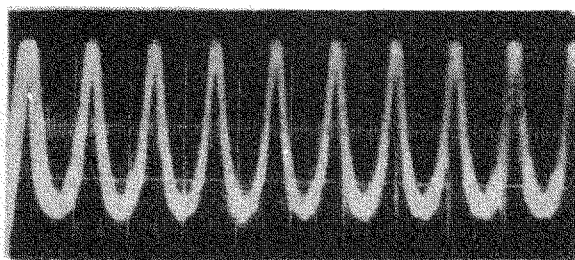


Рис. 2. Типичная осциллограмма колебаний тока

Наиболее чистые из выбранных для опыта образцов содержали суммарную концентрацию мелких акцепторных и донорных примесей порядка $5 \div 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ с разностной концентрацией около $1 \pm 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и имели как дырочную, так и электронную проводимость при температуре жидкого азота. В предварительных опытах по фотопьезосопротивлению были отобраны образцы, у которых основной вклад в фототок вносят электроны.

На рис. 1 приведены типичные осциллограммы вольт-амперных характеристик образца n -типа для температуры $4,2^\circ\text{K}$ (1,а), 20°K (1,б) и 30°K (1,в) и в случае действия поля вдоль оси $[111]$. Отчетливо виден участок отрицательного сопротивления, который при 30°K превращается в плато и с дальнейшим увеличением температуры исчезает. В случае температуры жидкого гелия носители создавались слабой постоянной подсветкой в области основного поглощения. Резкое увеличение тока при 10 в/см соответствует началу примесного пробоя. При более высоких температурах опыта подсветка отсутствовала. При 20°K имеется участок периодической неустойчивости, возникающей в области $2 - 8 \text{ в/см}$. Осциллограмма колебаний приведена на рис. 2. Частота колебаний примерно соответствует отношению дрейфовой скорости носителей к длине образца. При температуре $4,2^\circ\text{K}$ увеличение интенсивности подсветки приводило к уменьшению глубины отрицательного участка и к появлению осцилляций тока. Зачастую колебания носили нерегулярный характер.

Одноосное сжатие вдоль оси действия поля приводило к резкому уменьшению максимума на вольт-амперной кривой (рис. 3). При давлении $200 \div 300 \text{ кг/см}^2$ (для $T = 4,2^\circ\text{K}$) отрицательный участок исчезает

совсем. Такие изменения легко объяснить с точки зрения исследуемого эффекта, поскольку давление в направлении $[111]$ расщепляет зону

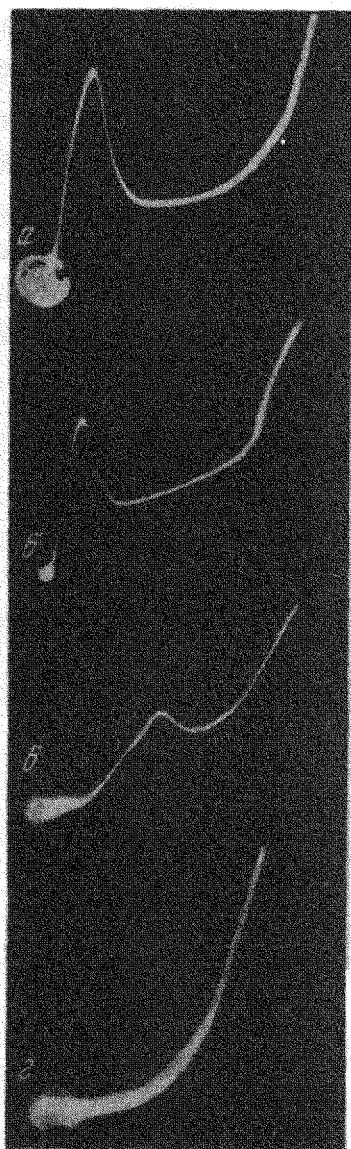


Рис. 3. Вольт-амперная кривая в зависимости от одноосного сжатия вдоль оси $[111]$ при $T = 4,2^\circ\text{K}$:
 $a - P = 0$, $б - P = 50 \text{ кг/см}^2$,
 $в - P = 100 \text{ кг/см}^2$, $г - P = 300 \text{ кг/см}^2$

проводимости на три долины и одну [3], и при совпадении направлений поля и сжатия энергетически ниже оказывается "холодная" долина, в которой скапливаются электроны в отсутствии поля. В этом случае разогрев носителей не приведет к увеличению сопротивления.

При действии поля вдоль оси [100] (при этом не происходит изменения заселенности долин) никаких особенностей на вольт-амперной кривой не наблюдалось.

Таким образом, результаты эксперимента свидетельствуют в пользу того, что обнаруженный эффект обязан своим происхождением междолинному перераспределению электронов при их разогреве.

В заключение авторы благодарят Л.Е.Воробьева за помощь в эксперименте и обсуждении результатов работы.

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

Поступило в редакцию
15 апреля 1968 г.

Литература

- [1] А.А.Кастальский. ФТП, 11, 5, 1968 г.
- [2] G. Weinreich, T. M. Sanders, H. G. White. Phys. Rev., 114, 33, 1959.
- [3] C. Herring, E. Vogt. Phys. Rev., 101, 944, 1956.