

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ В $\text{PbTe} : \text{Ga}$ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Б. А. Акимов, А. В. Албул, Е. В. Богданов, В. Ю. Ильин

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119899, Москва, Россия
(Получена 10 июня 1993 г. Принята к печати 12 июля 1993 г.)

Установлено, что при давлениях $P \geq 15$ кбар поведение высокоомных образцов $\text{PbTe} : \text{Ga}$ качественно изменяется: сильные электрические поля вместо обнаруженного ранее переключения в низкоомное состояние вызывают переключение образцов в высокоомное состояние с большим временем релаксации. При этом рост сопротивления достигает 2 порядков. После переключения вольт-амперные характеристики становятся суперлинейными, что характерно для проводимости по примесным центрам. Экспериментальные данные удается качественно объяснить, если учесть, что при $P \geq 15$ кбар примесный уровень, стабилизирующий уровень Ферми, оказывается в валентной зоне. В результате в слабых электрических полях при низких температурах наблюдается зонная проводимость. Сильное поле, перебрасывая носители (дырки) на резонансный уровень в долгоживущие состояния, подавляет зонную проводимость и приводит к проводимости по локальным центрам.

1. Как сообщалось ранее [1], в высокоомных (ВО) образцах монокристаллов $\text{PbTe} : \text{Ga}$ (содержание $\text{Ga} - 0.2 \div 0.4$ ат%) при низких температурах наблюдается эффект переключения в низкоомное (НО) состояние сильным электрическим полем. При этом время релаксации проводимости достигает при 4.2 К значений $\tau > 10^4$ с, что проявляется, в частности, в гистерезисе вольт-амперных характеристик (ВАХ). Эффект переключения электрическим полем ВО $\text{PbTe} : \text{Ga}$, как и фотопроводимость этого материала [2,3], связывается с ионизацией примесных состояний, обеспечивающих стабилизацию уровня Ферми ϵ_F , а значительные времена релаксации — с наличием барьера высотой W в конфигурационном пространстве между состояниями системы с локализованными и делокализованными электронами [1]. Вместе с тем известно [2], что при давлении $P > 15$ кбар в ВО кристаллах $\text{PbTe} : \text{Ga}$ характер примесных состояний качественно изменяется, и одновременно отмечаются долговременные релаксационные процессы в магнитном поле, связываемые также с наличием подобного барьера W . Поэтому представлялось интересным изучить влияние давления на эффект переключения ВО образцов $\text{PbTe} : \text{Ga}$ в электрическом поле.

2. Проведены исследования ВАХ, температурных и релаксационных зависимостей сопротивления R образцов $\text{PbTe} : \text{Ga}$ с содержанием Ga 0.2 и 0.3 ат% в диапазоне температур $T = 4.2 \div 300$ К в электрических полях до $E \leq 2000$ В/см и под давлением до 16 кбар. Монокристаллы $\text{PbTe} : \text{Ga}$ выращивались соответственно методами Чохральского (0.2 ат%) и «пар-кристалл» (0.3 ат%). В обоих случаях галлий вводился непосредственно в шихту. Прямоугольные образцы, имевшие характерные размеры $0.5 \times 0.8 \times 3$ мм и ориентированные вдоль оси $\langle 100 \rangle$, вырезались методом электроэрозии. Контакты подпаивались сплавом $0.95\text{In} + 0.04\text{Ag} + 0.01\text{Au}$. На обоих образцах при нормальном давлении проявлялся эффект переключения в НО состояние при низких температурах, хотя и в разной степени: если в материале с

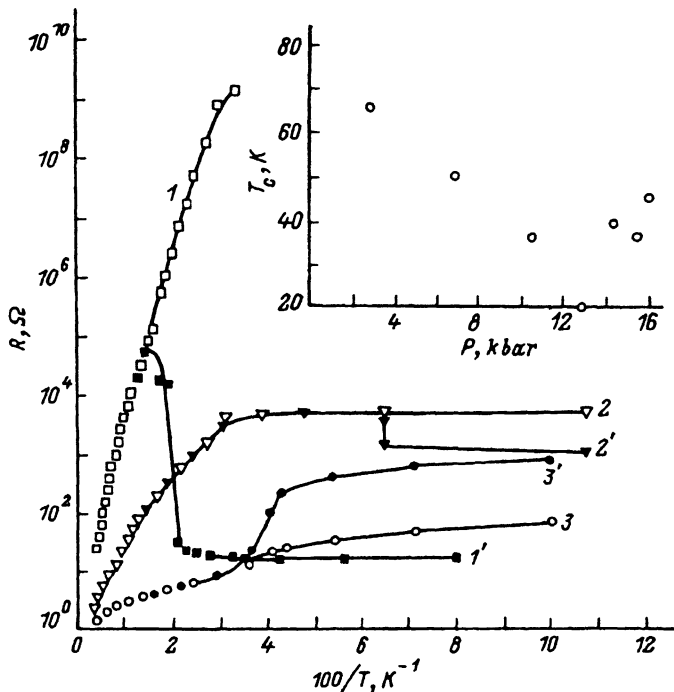


Рис. 1. Температурные зависимости сопротивления R образца PbTe с примесью 0.3 ат% Ga при давлениях P , кбар: 1, 1' — 0.001; 2, 2' — 12.5; 3, 3' — 16. 1—3 — темновое сопротивление, 1'—3' — получены при повышении температуры после переключения образца сильным электрическим полем при 4.2 К. На вставке — барическая зависимость критической температуры переключения T_c .

содержанием Ga 0.2 ат% проводимость возрастала не более чем в 4 раза, то в образце с содержанием Ga 0.3 ат% ее увеличение могло превышать 5 порядков при 4.2 К. Для получения высоких давлений применялась камера, описанная в работе [4]. Методика измерения ВАХ полностью соответствовала описанной в [1].

3. Всестороннее сжатие во всем диапазоне давлений приводило к известному [2] падению сопротивления высокоомных образцов $\text{PbTe}:\text{Ga}$ (рис. 1). Как и в [1], область выполнения закона Ома оставалась при сжатии весьма узкой ($E \leq 1$ В/см), а объясняемая в [1] механизмом нелинейной прыжковой проводимости [5] суперлинейность ВАХ при гелиевых и азотных температурах сохранялась до давлений $P \leq 14 \div 15$ кбар, хотя становилась менее выраженной (рис. 2, а). При этом сохранялся и эффект переключения в НО состоянии сильным электрическим полем (рис. 1, кривые 1', 2'; рис. 2, а), но критическая температура переключения T_c^1 монотонно падала до минимального значения ~ 20 К при $P \approx 12.5$ кбар (рис. 1, вставка).

При наиболее высоких достигнутых давлениях, $P > 15$ кбар, ВАХ качественно изменялись (рис. 2, б): в электрических полях до $E \leq 10$ В/см наблюдался омический участок; более сильные поля приводили к переключению,

¹ Величина T_c определялась по аналогии с критической температурой задержанной фотопроводимости [2] как точка совпадения равновесной и неравновесной ветвей температурной зависимости сопротивления (т. е. ветвей 1—3 и 1'—3' на рис. 1). Фактически это температура, при которой время релаксации неравновесных носителей достигает значений $\tau \sim 10^{-1}$ с, а измеренные величины R отличаются не более, чем на 1%.

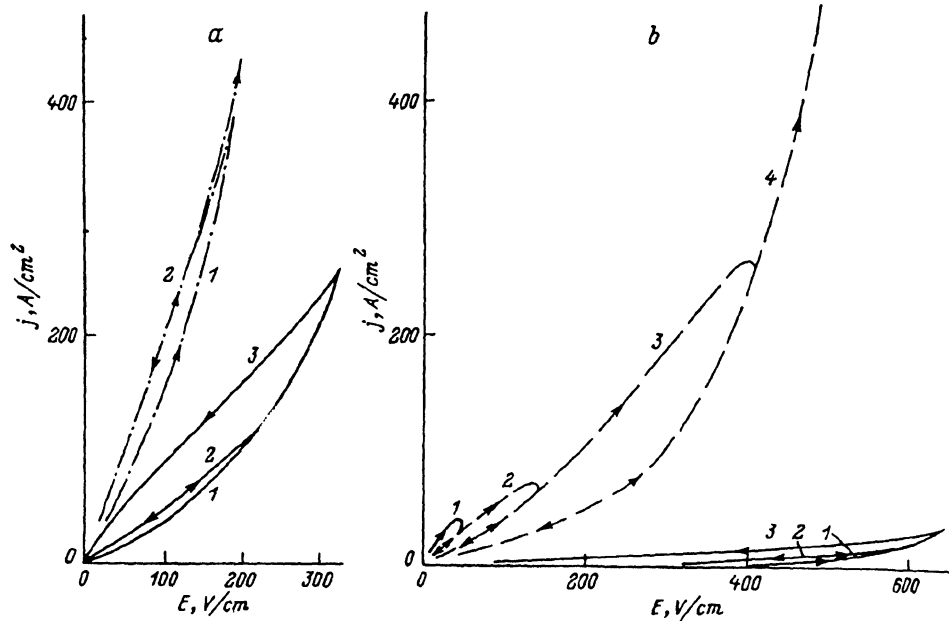


Рис. 2. ВАХ образцов PbTe с примесью Ga 0.2 (а) и 0.3 (б) ат% при нормальном давлении (сплошные линии). $P = 14.7$ (штрихпунктирные) и $P = 16$ кбар (штриховые). $T = 4.2$ К. Стрелки указывают направления ввода и вывода электрического поля, а цифры — последовательность циклов измерений.

но не в НО, а в ВО состоянии (см. также кривые 3 и 3' на рис. 1) с большим временем релаксации ($\tau > 10^4$ с) при гелиевых температурах. При этом после переключения ВАХ вновь становилась суперлинейной в широком диапазоне полей.

В переходной области давлений $P \approx 14 \div 15$ кбар при гелиевых температурах наблюдалось хаотическое изменение сопротивления образцов под действием импульсов сильного электрического поля. Одно и то же поле могло как увеличить проводимость материала, так и уменьшить ее, причем получаемые состояния являлись долгоживущими.

4. Представляется разумным интерпретировать полученные результаты в рамках подхода, применявшегося к PbTe : Ga в [2,3]. Согласно этому подходу, в некоторой степени по аналогии со случаем сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$: In, считается, что введение примеси Ga приводит к образованию узкого, емкого и стабилизирующего положения уровня Ферми квазилокального уровня ϵ_1 , природа которого может быть напрямую не связана с примесью, и положение которого относительно краев зон может меняться при внешних воздействиях, таких как давление.

Согласно [2], под давлением примесный уровень ϵ_1 изменяет свое положение в запрещенной зоне, что отражается в уменьшении энергии активации примесной проводимости, а при $P \approx 15$ кбар он пересекает потолок валентной зоны, выходя из запрещенной зоны. Таким образом, PbTe : Ga переходит из ВО диэлектрического состояния при $P < 15$ кбар, которое характеризуется при низких температурах электропереносом по примесным состояниям, в металлическое при $P > 15$ кбар, в котором уровень ϵ_1 , стабилизирующий положение уровня Ферми, перекрывается с валентной зоной, а при низких температурах за электроперенос в значительной степени отвечают дырки в валентной зоне. Вполне разумным следствием этого является, в частности,

расширение области омичности ВАХ. Кроме того, известно, что в металлической фазе сплавов $Pb_{1-x}Sn_xTe$: In, когда положение уровня Ферми также стабилизируется примесным уровнем, сильное электрическое поле вызывает переключение именно в ВО состояние вследствие роста темпа захвата свободных зонных носителей примесными центрами [6]. Поэтому естественно предположить аналогичный механизм переключения сильным электрическим полем образцов $PbTe$: Ga в ВО состояние при $P > 15$ кбар (рис. 2, б).

Такое объяснение согласуется и с наблюдавшимися в [2] релаксациями коэффициента Холла в сильном магнитном поле в индуцированной высоким давлением, $P > 15$ кбар, металлической фазе $PbTe$: Ga при температурах $15 \div 20$ К. Эти релаксации, представляющие падение величины коэффициента Холла со временем, также связаны с переходами носителей между локализованными и зонными состояниями. Правда, нарушение равновесия в распределении носителей между зонными и примесными состояниями обусловлено в этом случае ростом плотности состояний у потолка валентной зоны в квантовых магнитных полях [2]. Однако следует отметить, что если в [2] существенная релаксация ($\tau \sim 10^{-1}$ с) наблюдается при давлении 16.5 кбар уже при температуре 17.6 К, то в нашем случае величина τ становится того же порядка при $T_c \approx 40$ К (см. вставку на рис. 1). Причина такого различия может заключаться, в частности, в некоторой неоднородности образцов [3], обуславливающей различное действие магнитного и электрического полей: если первое действует на весь объем образца, то второе действует более локально — напряжение падает в основном на ВО областях, которые, вообще говоря, могут характеризоваться большими значениями T_c .

Сложнее обстоит дело с промежуточной областью давлений. В теоретическом аспекте существуют неясности в поведении локального уровня. Естественная попытка приписать изменение свойств вещества под давлением монотонному смещению стабилизирующего ϵ_F примесного уровня наталкивается на существенные трудности. Если считать энергию активации примесной проводимости ϵ_A характеризующей положение уровня, то согласно данным [2], где указывается, что $d\epsilon_A/dP \approx d\epsilon_g/dP$ (здесь ϵ_g — энергетическая щель), уровень под давлением движется параллельно потолку валентной зоны и при $P \geq 15$ кбар он должен перекрываться с зоной проводимости. В таком случае остается только предположить наличие некоторого фазового перехода, связанного с изменением зарядового состояния примеси галлия, подобно переходу, наблюдавшемуся под давлением в $Pb_{1-x}Sn_xTe$: Ga [7]. Однако факт отсутствия строгой фиксации давления в использованных как в настоящей работе, так и в [2] камерах высокого давления в области температур, при которых определялась энергия активации примесной проводимости, ставит под сомнение корректность приводимого значения $d\epsilon_A/dP$. Кроме того, очевидно, что в промежуточной области давлений может реализовываться ситуация, когда сложно разделить участки активации примесной и собственной проводимости, что приводит к невозможности пользоваться простейшими законами для определения энергии активации и холловской концентрации носителей.

Заметное уменьшение разницы стимулированной электрическим полем и равновесной проводимости, падение критической температуры задержки проводимости T_c в области давлений до 12.5 кбар (рис. 1) в рамках выбранной модели можно связать с уменьшением величины барьера W . С этим предположением также качественно согласуется наблюдающееся уменьшение критического поля переключения образцов в НО состояние (рис. 2, а).

В переходной области давлений при $P \approx 14 \div 15$ кбар наблюдалось, как отмечалось выше, хаотическое изменение сопротивления образцов под действием импульсов сильного электрического поля. Это естественно считать следствием сравнимого вклада областей образца с зонной и прыжковой про-

водимостью. Необходимо отметить, что такого рода флуктуации сопротивления после серии импульсов электрического поля наблюдались в отдельных случаях и при низких давлениях, но там сначала отмечался скачок (уменьшение) сопротивления, по величине на порядки превышающий масштаб подобных флуктуаций.

После переходной области при $P > 15$ кбар, видимо, происходит рост величины барьера W , о чем свидетельствует увеличение T_c (вставка на рис. 1).

Эта работа частично поддерживалась грантом Фонда Сороса, присужденным Американским Физическим Обществом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Б. А. Акимов, А. В. Албул, Е. В. Богданов, В. Ю. Ильин. ФТП, 26, 1300 (1992).
- [2] Б. А. Акимов, Н. Б. Брандт, А. М. Гаськов, В. П. Зломанов, Л. И. Рябова. ФТП, 17, 87 (1983).
- [3] С. А. Белоконь, Л. Н. Верещагина, И. И. Иванчик, Л. И. Рябова, Д. Р. Хохлов. ФТП, 26, 264 (1992).
- [4] Е. С. Ицкевич. ПТЭ, вып. 4, 148 (1963).
- [5] Б. И. Шкловский. ФТП, 10, 1440 (1976).
- [6] Б. А. Акимов, Н. Б. Брандт, В. Н. Никифоров. ФТТ, 26, 1602 (1984).
- [7] Б. А. Акимов, Н. Б. Брандт, Л. И. Рябова, Д. Р. Хохлов, С. М. Чудинов, О. Б. Яценко. Письма в ЖЭТФ, 31, 304 (1980).

Редактор Л. В. Шаронова
