

О ПРИРОДЕ ЗАДЕРЖАННОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В $\text{PbTe}(\text{Ga})$ *А.Н.Васильев, Т.Н.Волошок, Ю.П.Гайдуков, Н.П.Данилова**Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова**119899 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 3 ноября 1993 г.

После переработки 22 ноября 1993 г.

Исследованы температурные зависимости сопротивления, скорости и затухания ультразвука в PbTe и $\text{PbTe}(\text{Ga})$. На основе полученных данных и анализа легирующего действия Ga в PbTe предложена модель задержанной фотопроводимости в этом материале.

Теллурид свинца, легированный галлием, принадлежит к числу материалов, обнаруживающих при низких температурах одно из наиболее интересных проявлений твердотельной памяти – задержанную фотопроводимость. Растворимость Ga в PbTe невелика. В качестве примеси замещения не более одного атомного процента Ga входит в подрешетку свинца. Даже в этих узких пределах поведение легирующей примеси необычно. По мере увеличения содержания Ga в образцах PbTe p -типа концентрация дырок линейно уменьшается, что переводит кристаллы в компенсированное состояние при $N_{\text{Ga}} \approx 0,1$ ат.пр. Дальнейшее легирование, однако, не выводит $\text{PbTe}(\text{Ga})$ из диэлектрической фазы, которая сохраняется вплоть до $N_{\text{Ga}} \approx 0,3$ ат.пр. Лишь за пределами этого интервала происходит p – n -конверсия и концентрация электронов в образцах n -типа быстро возрастает [1]. При $T \leq T_C = 80$ К освещение высокоомных кристаллов источником видимого или инфракрасного излучения переводит их в проводящее состояние, которое сохраняется и после выключения подсветки. Время релаксации индуцированной подсветкой проводимости быстро возрастает с понижением температуры, достигая значений $\tau > 10^5$ с при $T = 4,2$ К [2]. Важность возможных практических приложений обнаруженного явления стимулировала проведение широкого круга экспериментальных исследований (см. обзор [3] и цитированную в нем литературу) и построение ряда теоретических моделей, среди которых выделяются гипотезы деформации ближайшего окружения примеси [4] и ян-теллеровской перестройки примесных центров [5]. В качестве альтернативы указанным моделям для объяснения задержанной фотопроводимости выдвигалось также предположение о крупномасштабном потенциальном рельефе, обязанном неоднородности кристалла [6].

Для проверки любой из этих гипотез наряду с электрофизическими измерениями нужны экспериментальные данные о состоянии кристаллической решетки. В настоящей работе исследованы температурные зависимости скорости S и затухания γ продольного ультразвука в PbTe и $\text{PbTe}(\text{Ga})$. Поскольку эксперимент предусматривал одновременную регистрацию фотоэффекта и акустических свойств кристаллов, измерения S и γ проводились с использованием бесконтактной методики, основанной на эффекте прямого преобразования электромагнитных и ультразвуковых волн в магнитном поле [7]. Такой подход, в отличие от традиционных контактных методик, не препятствует освещению рабочих поверхностей образца.

Измерения проводились на монокристаллических плоскопараллельных пластинах PbTe и $\text{PbTe}(\text{Ga})$ с поперечными размерами порядка 1 см и толщинами около 0,1 см, нормали к плоскостям которых совпадали с осями симметрии четвертого порядка [001]. Поведение нелегированного кристалла PbTe изучалось для получения опорной базы данных. Содержание Ga в легированном кристалле PbTe – 0,3 ат. пр., что соответствует области наиболее высокой фоточувствительности для этого соединения. Образец в экранированной от внешней подсветки измерительной камере размещался в двух соленоидальных соосных катушках индуктивности, одной из которых осуществлялось возбуждение, а другой – регистрация стоячих ультразвуковых волн в пластине. Измерения проводились в температурном интервале 4–100 К, в магнитном поле 7 Тл. Между измерительными катушками размещалась миниатюрная лампа накаливания, которая использовалась для кратковременной подсветки кристалла при гелиевой температуре. Для контроля сопротивления образцов к их боковым граням подпаивались электрические контакты. Температура регистрировалась термопарой CuFe-Cu .

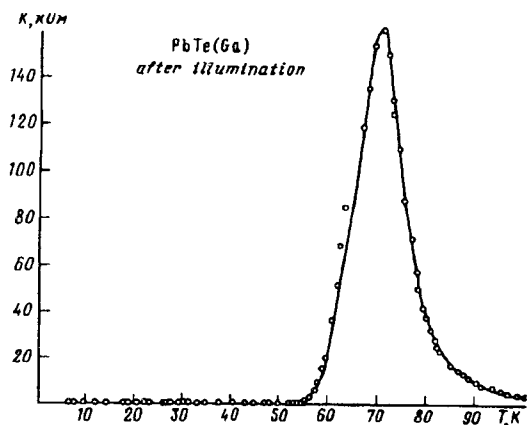


Рис.1. Температурная зависимость сопротивления $\text{PbTe}(\text{Ga})$ при отогреве после низкотемпературной подсветки

В силу отклонений от стехиометрии нелегированный образец PbTe характеризовался высокой концентрацией носителей даже при гелиевых температурах ($p > 10^{19} \text{ см}^{-3}$). С изменением температуры он показал металлический ход сопротивления, не обнаруживая при этом никаких явлений, связанных с задержанной фотопроводимостью. Монокристалл $\text{PbTe}(\text{Ga})$, напротив, демонстрировал полупроводниковый ход сопротивления, достигая при низких температурах значений $\rho \geq 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. При $T = 4,2 \text{ К}$ сопротивление образца при подсветке уменьшалось до значений $\rho \sim 10^{-1} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Температурный ход сопротивления $\text{PbTe}(\text{Ga})$ при отогреве после низкотемпературной подсветки показан на рис.1. В широком температурном интервале сопротивление почти не менялось, затем наблюдался сильный рост ρ , который при высоких температурах сменялся экспоненциальным спадом.

Абсолютные значения скорости продольного ультразвука в исследованных образцах определялись из измерений толщины пластины и положения на шкале частот акустического резонанса. Измеренное таким образом значение скорости продольного ультразвука S в PbTe при $T = 4,2 \text{ К}$ составило $(3,8 \pm 0,1) \cdot 10^5 \text{ см/с}$, а в $\text{PbTe}(\text{Ga})$ – $(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^5 \text{ см/с}$. Из этих данных следует, что сжимаемость $\text{PbTe}(\text{Ga})$ в пять раз превышает сжимаемость PbTe . Температурная

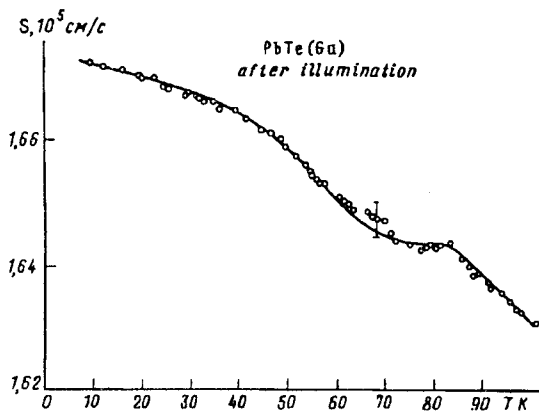


Рис.2. Температурная зависимость скорости продольного ультразвука в PbTe(Ga) при отогреве после низкотемпературной подсветки

зависимость скорости продольного ультразвука в PbTe(Ga), полученная после низкотемпературной подсветки, показана на рис.2. В температурном интервале, соответствующем аномально быстрому росту и спаду сопротивления образца, проявляется слабое дополнительное смягчение модуля сжатия, которое, впрочем, находится на грани чувствительности метода.

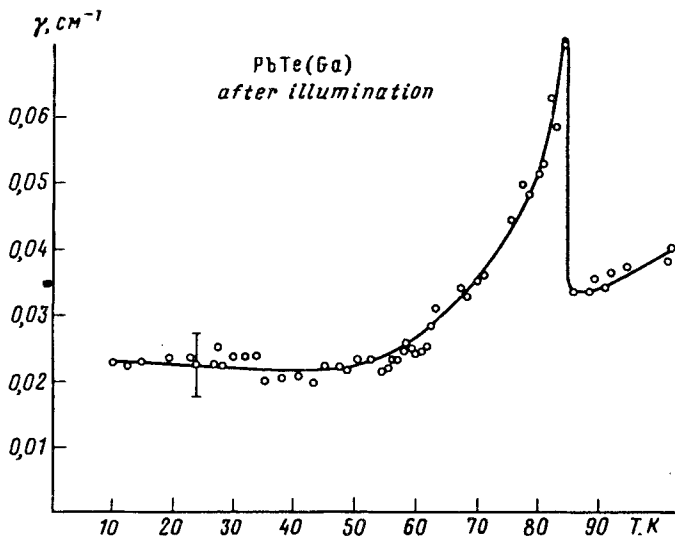


Рис.3. Температурная зависимость затухания продольного ультразвука в PbTe(Ga) при отогреве после низкотемпературной подсветки

Из исследованных в настоящей работе акустических параметров PbTe(Ga) наиболее чувствительным к изменению температуры оказалось затухание ультразвука. Температурная зависимость γ в PbTe(Ga) после низкотемпературной подсветки показана на рис.3. На кривой $\gamma(T)$ видна четко выраженная аномалия при $T_c = 80$ К. Отметим, что без подсветки в этой области наблюдается лишь монотонное увеличение затухания. Качественно поведение γ в этой области напоминает ход затухания при структурном фазовом переходе. Однако сохраняющееся достаточно низким абсолютное значение затухания при критической температуре и отсутствие заметного скачка скорости ультразвука указывают на то, что структурного перехода в матрице PbTe не происходит.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют высказать некоторые предположения о природе задержанной фотопроводимости в $\text{PbTe}(\text{Ga})$. Она, на наш взгляд, не связана с крупномасштабной неоднородностью кристалла. Потенциальный рельеф, препятствующий возвращению электронов из зоны проводимости на примесные центры после выключения подсветки в неоднородном кристалле, не характеризуется какой-либо выделенной энергией, что исключает существование четко определенной критической температуры и противоречит существенно немонотонным температурным зависимостям сопро- твления и затухания ультразвука.

Наиболее естественной причиной, препятствующей быстрой релаксации фотопроводимости, нам представляется перестройка состояния примесного центра в решетке при изменении его зарядового состояния. Мы исходим из того, что уже при легировании атомы Ga замещают Pb с различными конфигурациями электронных оболочек¹⁾. Первая возможность – Ga^{2p^3} , когда два электрона уходят на образование ионно-ковалентных связей с Te , а один электрон оказывает донорное воздействие, компенсируя акцепторные центры другой природы. С этим связано уменьшение концентрации дырок вплоть до уровня содержания Ga в твердом растворе порядка 10^{19} см^{-3} . При дальнейшем увеличении содержания галлия в твердом растворе он замещает свинец в конфигурации Ga^{1p^2} , не оказывая донорного воздействия. При подсветке атомы галлия в конфигурации Ga^{1p^2} могут отдавать один электрон в зону проводимости, изменяя при этом состояние примесного центра. Потенциальный барьер, разделяющий ионизованное и неионизованное состояния Ga , препятствует возвращению электронов на примесные центры, его высоту можно оценить по величине критической температуры $T_c = 80 \text{ К}$. Суммарная энергия электрона в зоне проводимости и примесного центра в новом состоянии выше исходной энергии неионизованной примеси, что обуславливает метастабильный характер задержанной фотопроводимости.

С повышением температуры увеличивается кинетическая энергия электронов в зоне проводимости и возрастает амплитуда колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, при этом увеличивается и вероятность перехода Ga в исходное состояние с возвращением электрона из зоны проводимости. Распространяющаяся в кристалле волна сжатия может, в принципе, стимулировать этот процесс. В результате перестройки примесных центров возрастает вероятность рассеяния длинноволновых акустических фононов, что проявляется как пик затухания ультразвука при критической температуре.

Сделанные нами предположения о природе задержанной фотопроводимости в $\text{PbTe}(\text{Ga})$ имеют очень важное следствие. В конфигурации Ga^{1p^2} атомы галлия должны иметь нескомпенсированный магнитный момент. Проведенные нами предварительные исследования магнитной восприимчивости не противоречат этой гипотезе.

В заключение авторы выражают благодарность Б.А.Акимову, Н.Б.Брандту, Л.И.Рябовой за поддержку и Б.А.Волкову за многочисленные обсуждения.

Данная работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований "Университеты России" и поддержана грантом Американского физического общества.

¹⁾ На возможность существования примесей третьей группы в халькогенидах свинца в различных электронных конфигурациях указали Волков и Тугушев [8].

-
1. Ф.Ф.Сизов, С.В.Пляцко, В.М.Лакеенков, ФТП **19**, 592 (1985).
 2. Б.А.Акимов, Н.Б.Брандт, А.М.Гаськов и др., ФТП **17**, 87 (1983).
 3. В.А.Акимов, А.В.Дмитриев, Д.Р.Кхокхлов, and Л.И.Рябова, Phys. Stat. Sol. (a), **137**, 9 (1993).
 4. Ю.Каган, К.А.Кикоин, Письма в ЖЭТФ **31**, 367 (1980).
 5. Б.А.Волков, О.А.Панкратов, ДАН СССР **255**, 93 (1980).
 6. С.А.Белоконь, Л.Н.Верещагина, И.И.Иванчик и др., ФТП **26**, 264 (1992).
 7. А.Н.Васильев, Ю.П.Гайдуков, УФН **141**, 431 (1983).
 8. Б.А.Волков, В.В.Тугушев, Письма в ЖЭТФ, **46**, 193 (1987).