

Импеданс твердых растворов на основе теллурида свинца, легированного галлием

© Б.А. Акимов, В.В. Прядун, Л.И. Рябова[¶], Д.Р. Хохлов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 9 июня 2003 г. Принята к печати 18 июня 2003 г.)

Импеданс монокристаллических образцов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ и $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ исследован в диапазоне частот от 10^2 до 10^6 Гц при температурах от 4.2 до 300 К. Показано, что эффекты, связанные с долговременными релаксационными процессами, не являются следствием сегнетоэлектрического фазового перехода, поскольку наблюдаются при существенно более низких температурах. Низкотемпературные особенности поведения емкости в $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ рассматриваются как вклад примесной подсистемы.

Галлий в теллуриде свинца и ряде твердых растворов на его основе проявляет переменную валентность, что приводит к формированию системы примесных уровней, стабилизации положения уровня Ферми (УФ) и долговременным релаксационным процессам при температурах T ниже $T_C \approx 80$ К. Стабилизация УФ в твердых растворах на основе теллурида свинца, легированного галлием, во всех известных случаях осуществляется внутри запрещенной зоны, что приводит к формированию полуизолирующего состояния в кристаллах при низких температурах [1]. Учитывая резкое изменение проводимости в условиях подсветки при $T = T_C$, нелинейность вольт-амперных характеристик, аномальные магнитные свойства $\text{PbTe}(\text{Ga})$ в области низких температур, нельзя было полностью исключить и возможность фазового перехода, индуцированного легированием.

Прямая экспериментальная информация о наличии фазового перехода и о его возможном влиянии на корреляционные процессы в системе (кристаллическая решетка–примесные центры) может быть получена при исследовании полного импеданса. В дополнение к $\text{PbTe}(\text{Ga})$ в качестве объектов исследования были выбраны монокристаллические образцы $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$, электрофизические и фотоэлектрические характеристики которых ранее подробно исследовались в работах [2–5].

Образцы имели форму прямоугольных пластин площадью $\sim 4 \times 4 \text{ мм}^2$ и толщиной ~ 1 мм. Поверхность пластин покрывалась сплавом 95% In+4% Ag+1% Au. Измерения проводились с использованием камеры, экранирующей образцы от фоновой подсветки, на мостах переменного тока E7-12 и MIT 9216A на частотах f от 100 Гц до 1 МГц в температурном интервале 4.2–300 К.

На рис. 1 приведены температурные зависимости удельного сопротивления ρ образцов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ (кривая 1) и $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ (2), полученные на постоянном токе. Высокотемпературные участки кривых (см. вставку к рис. 1) характеризуются активационной зависимостью проводимости от температуры с

энергиями $E_a \approx 50$ мэВ (1) и 75 мэВ (2), рассчитанными из соотношения $\rho \propto \exp(E_a/kT)$. Для образца $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ на кривой $\rho(T)$ при $T = T_M \approx 90$ К наблюдается максимум. Реальная часть импеданса Z' практически совпадает с ρ при измерениях на частотах менее 10^5 Гц. При частоте 1 МГц в области максимума величина Z' оказывается приблизительно в 2 раза ниже ρ .

Как видно из рис. 1, исследованные кристаллы не являются диэлектриками, их проводимость, особенно в области высоких температур, достаточно высока. Для более низкоомного $\text{PbTe}(\text{Ga})$ получить достоверные дан-

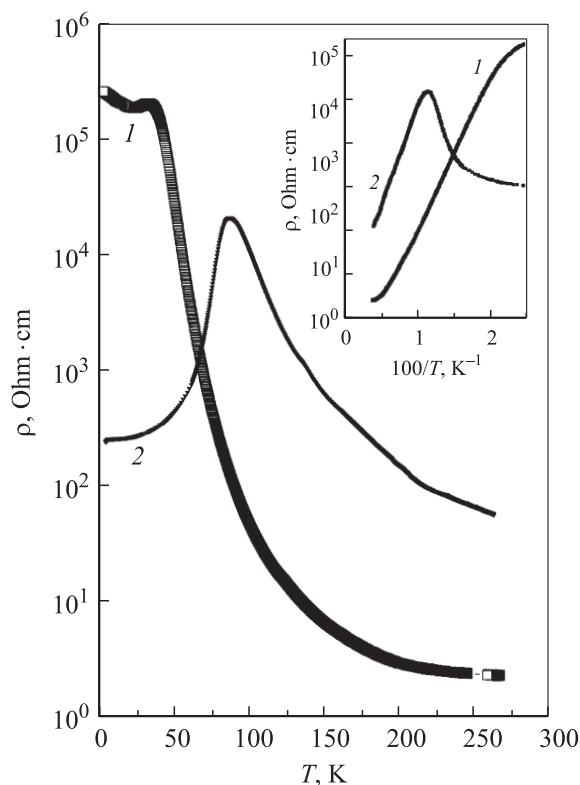


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образцов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ (1) и $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ (2). На вставке — высокотемпературные участки тех же кривых в зависимости от обратной температуры.

[¶] E-mail: mila@mig.phys.msu.ru
Факс: (095) 9328876

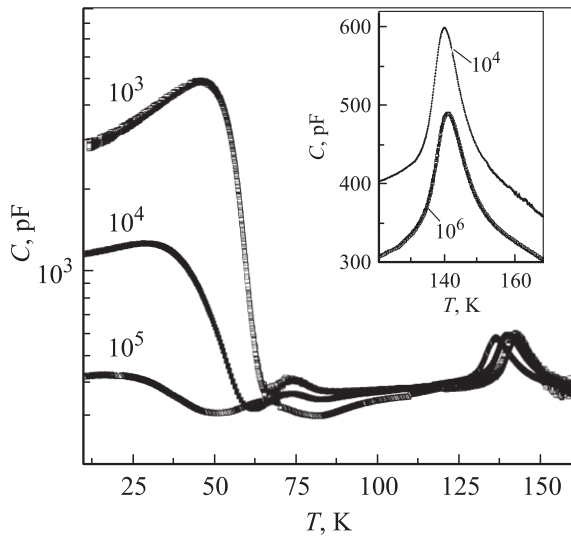


Рис. 2. Температурные зависимости емкости для образца $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$. Цифры у кривых — частота в Гц. Геометрическая емкость образца $C_0 = 0.18$ пФ.

ные по импедансу оказалось возможным лишь в области температур ниже 80 К, для $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ — при температурах ниже 170 К. При обработке экспериментальных данных емкость кристаллов рассчитывалась из значений реальной Z' и мнимой Z'' частей импеданса в приближении эквивалентной схемы параллельной RC цепочки.

Температурные зависимости емкости образца, измеренной на разных частотах, для $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, при $T_F \approx 140$ К на зависимости $C(T)$ наблюдается отчетливый пик, положение которого не имеет выраженной зависимости от частоты (см. вставку к рис. 2). Температура пика на ~ 20 К ниже температуры перехода из кубической фазы в ромбоэдрическую для нелегированного сплава того же состава. Понижение температуры фазового перехода на вполне сопоставимую величину было обнаружено и при легировании сплавов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$ индием [6].

В области низких температур $T < 70$ К емкость $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ обнаруживает сильную частотную зависимость. При низких частотах $f \approx 10^3$ Гц наблюдается резкое, практически скачкообразное, возрастание емкости C почти на порядок величины. С ростом f амплитуда скачка уменьшается, и при $f = 10^5$ Гц зависимость $C(T)$ становится достаточно гладкой. Для монокристаллов $\text{PbTe}(\text{Ga})$ в области температур $T < 70$ К емкость практически не зависела ни от температуры, ни от частоты f . При этом величина C соответствовала значению диэлектрической проницаемости $\varepsilon \approx 1000$.

Дополнительный вклад в емкость, наблюдаемый в $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ в низкочастотном диапазоне, нельзя связать с процессами, обусловленными поляризацией или резонансными эффектами собственно кристаллической решетки. Наиболее вероятной причиной уве-

личения емкости могут быть процессы, связанные с перезарядкой примесных центров. Аналогичный эффект в том же частотном диапазоне ранее наблюдался в гетеропереходах германиево-кремниевых диодов и объяснялся как вклад от перезарядки граничных состояний в емкость p - n -перехода [7].

Одним из факторов, определяющих различия в поведении примесной подсистемы в образцах $\text{PbTe}(\text{Ga})$ и $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$, может быть отсутствие стабилизации УФ в образцах твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$. На это, в частности, указывают результаты ранее проведенных экспериментов по изучению влияния облучения быстрыми электронами на электрофизические свойства образцов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$ [3,5]. Известно, что диапазон концентраций примеси галлия, в котором наблюдается эффект стабилизации УФ в $\text{PbTe}(\text{Ga})$, достаточно узок [1]. Поскольку облучение быстрыми электронами генерирует дефекты донорного типа, в кристаллах p - $\text{PbTe}(\text{Ga})$ с малым уровнем легирования при увеличении дозы облучения наблюдается смена типа проводимости с последующей стабилизацией положения УФ [8]. В образцах $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$ облучение приводило к снижению сопротивления и переходу к металлической проводимости. Это может быть связано с избыточным содержанием галлия в исследованных образцах. В отсутствие эффекта стабилизации УФ неравномерное распределение примеси по кристаллу должно влиять на гальваномагнитные характеристики образцов. Это было подтверждено данными по измерению эффекта Холла в $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}(\text{Ga})$ [2].

Важно, что температура фазового перехода T_F в $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ оказалась существенно выше, чем характерные температуры T_C (~ 80 К) появления задержанной фотопроводимости, температуры T_M (~ 90 К) перегиба на зависимости $\rho(T)$ и температуры появления низкочастотных аномалий (~ 70 К) на температурных зависимостях емкости. Таким образом, полученные данные указывают на отсутствие прямой связи между фазовым переходом и долговременными релаксационными процессами в исследованных образцах.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 01-02-16356, № 02-02-17057 и ИНТАС № 2001-0184.

Список литературы

- [1] Б.А. Волков, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. УФН, **172**, 875 (2002).
- [2] Б.А. Акимов, А.В. Албул, И.И. Иванчик, Л.И. Рябова, Е.И. Слынько, Д.Р. Хохлов. ФТП, **27**, 355 (1993).
- [3] E.P. Skipetrov, E.A. Zvereva, L.A. Skipetrova, V.V. Belousov, A.M. Musaitin. J. Cryst. Growth, **210**, 292 (2000).
- [4] E.P. Skipetrov, E.A. Zvereva, V.V. Belousov, L.A. Skipetrova, E.I. Slynko. Phys. St. Sol. (b), **221**, 549 (2000).
- [5] E.P. Skipetrov, E.A. Zvereva, O.S. Volkova, E.I. Slynko, A.M. Musaitin. Mater. Sci. Eng., **B91-92**, 416 (2002).
- [6] А.И. Лебедев, Х.А. Абдуллин. ФТП, **18**, 624 (1984).

- [7] J.P. Donnelly, A.G. Milnes. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-14**, 63 (1967).
- [8] Е.П. Скипетров, А.Н. Некрасова, Д.В. Пелехов, Л.И. Рябова, В.И. Сидоров. ФТП, **28**, 1626 (1994).

Редактор Л.В. Беляков

Impedance of lead telluride based solid solutions doped with gallium

B.A. Akimov, V.V. Pryadun, L.I. Ryabova, D.R. Khokhlov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract The impedance measurements were done for PbTe(Ga) and $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ single crystals at reference signal frequency varied within 10^2 – 10^6 Hz in the temperature interval 4.2–300 K. The ferroelectric phase transition temperature for $\text{Pb}_{0.94}\text{Ge}_{0.06}\text{Te}(\text{Ga})$ is found to be significantly higher than the characteristic temperatures of the long term relaxation processes appearance. Thus these phenomena seem not to be correlated directly. The low temperature behavior of the capacitance is related to the impurity system.