

УДК 621.315

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В $A^{IV}B^{VI}$

С. П. Гришечкина

Изучались электрические характеристики узкощелевого полупроводника $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ в области температур, включающих температуру сегнетоэлектрического фазового перехода. Измерены температурные зависимости спонтанного тока и напряжения, возникающих в образцах после охлаждения до $T = 4,2$ К, а также температурный ход сопротивления в сильном электрическом поле. Показано, что интерпретация данных, полученных ниже температуры фазового перехода, требует учета возникающего в сегнетофазе разбиения образцов на домены, стимулируемого неомичностью контактов.

Известно, что среди узкощелевых полупроводников типа $A^{IV}B^{VI}$ имеется целый ряд сплавов на основе теллурида свинца, в которых при понижении температуры наблюдается переход из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу. Одним из наиболее изученных является $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$, электрические, оптические и магнитные свойства которого достаточно подробно исследованы.

В данной работе мы сообщаем о наблюдении гистерезисных явлений в электрических характеристиках $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ при прямом ($+dT/dt$) и обратном ($-dT/dt$) ходе температуры для температур, включающих температуру сегнетоэлектрического фазового перехода. Известно [1], что в материале этого состава температура фазового перехода (T_c) близка к 33 К, поэтому измерения проводились в диапазоне температур от 4,2 К до 77 К. Измерялись образцы $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te$, легированные индием, с концентрациями электронов $n_{77K} \cong 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_{77K} = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Для исключения остаточной проводимости, которая возникала в этом материале под действием излучения от далекого ИК до видимого света [2-4], образцы помещались в объем, экранированный от фонового излучения.

Измерения показали, что в неосвещенных образцах при $T = 4,2 \text{ K}$ наблюдалось спонтанное напряжение, величина которого зависела от скорости охлаждения образца и от того, были ли при охлаждении закорочены или разомкнуты контакты 4 – 5 (см. рис. 1). Ранее на подобных образцах при $T > 20 \text{ K}$ также было наблюденo увеличение спонтанного напряжения [5], из температурной зависимости которого была сделана оценка спонтанной поляризации в этом материале.

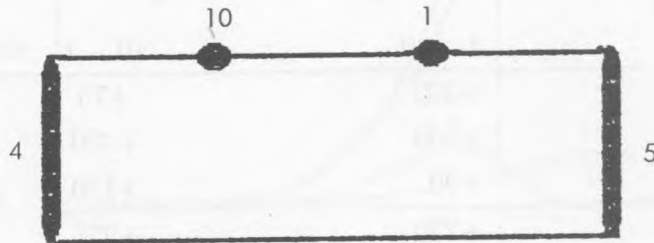


Рис. 1. Схема образца с контактами.

Проведенные нами измерения показали, что спонтанное напряжение весьма неоднородно распределено по длине образца. Неоднородность распределения напряжения видна из таблицы, где приведены измерения напряжения на одном из образцов при $T = 4,2 \text{ K}$ между контактами 4 – 10, 10–1 и 1–5 (см. рис. 1), расстояние между которыми было одинаковым, а также изменение этих напряжений под действием внешнего напряжения $\pm 350 \text{ мВ}$. Оказалось, что величина измеряемого спонтанного напряжения значительно превосходит контактную разность потенциалов в этом материале ($U_c = E_g/e = 88 \text{ мВ}$, E_g – ширина запрещенной зоны, e – заряд электрона). Обнаружено, что величина и распределение напряжения на контактах изменялись при подаче внешнего напряжения и, кроме того, зависели от его полярности (см. N 2 и N 3). Следует отметить также зависимость величины и распределения напряжения на контактах от предыстории образца, то есть от того, какое распределение напряжения на нем было до подачи данного внешнего напряжения (см. N 2 и N 4 в табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Спонтанное напряжение на образце $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ между контактами, представленными на рис. 2, в отсутствие внешнего напряжения и при $V = (+$ или -350 мВ), $T = 4,2$ К

N	Внешнее напряжение на контактах 4 - 5, мВ (+ при "+" на контакте 4)	Измеряемое напряжение на контактах, мВ		
		4 - 10	10 - 1	1 - 5
1	0	+300	+75	+100
2	+350	+300	+330	+325
3	-350	+22	+120	+350
4	+350	+230	+255	+330

При закорачивании контактов 4 и 5 на малое сопротивление можно было наблюдать спонтанный ток (рис. 2, кривые 3 и 4), величина которого при $T = 4,2$ К была меньше, чем $I = U_s/R$, где U_s - спонтанное напряжение, R - сопротивление образца, измеренное при малом внешнем напряжении. При $T \cong T_c$ спонтанный ток уменьшался до нуля и затем изменял полярность (см. вставку на рис. 2). В сегнетофазе различие в величинах спонтанных токов, измеренных при $+$ и $-dT/dt$, было невелико (кривые 3 и 4 на вставке). В отличие от сегнетофазы, в парафазе при $T > T_c$ температурные зависимости спонтанного тока, измеренных при $+$ и $-dT/dt$, различались столь заметно, что, не обсуждая их причины, можно было говорить о наблюдении гистерезиса спонтанного тока при $T \gg T_c$ (рис. 2, кривые 3 и 4), который увеличивался с ростом dT/dt .

При подаче внешнего напряжения U , даже когда оно было меньше U_s , измеряемый ток превышал спонтанный и его полярность соответствовала приложенному напряжению (рис. 2, кривые 1 и 2). При $U < U_s$ измеряемый ток увеличивался с ростом U , а различие в температурных зависимостях тока при $+$ и $-dT/dt$ было близко к тому, которое наблюдалось в этом температурном диапазоне для спонтанного тока.

При внешнем напряжении $U > U_s$ полярность тока во всем температурном диапазоне по-прежнему определялась внешним напряжением, однако зависимость величины тока от приложенного напряжения существенно отличалась от наблюдающейся при $U < U_s$. Так в области температур $T < 10 - 15$ К величина тока падала с ростом напряжения, а при $10 - 15$ К $< T < T_c$ росла, кроме того, проявлялся гистерезис на температурных зависимостях тока, измеренных при "+" и "-" dT/dt . Уменьшение тока при увеличении

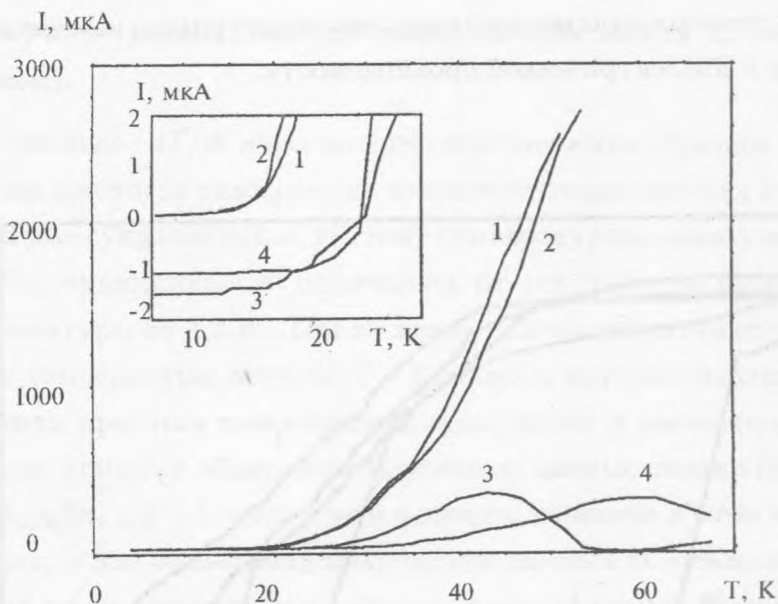


Рис. 2. Зависимость тока от температуры для образца $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$: (1, 2) при напряжении $U = 0,051 В$; (3, 4) без напряжения на образце. Кривые 1 и 3 измерены при повышении температуры от 4,2 до 50 К, 2 и 4 – при понижении температуры. На вставке – те же кривые с увеличенным масштабом по току в области температур $T < T_c$.

напряжения может быть вызвано лишь опережающим ростом сопротивления, поэтому изменение характеристик образца при $U > U_s$ более четко проявляется в температурном ходе сопротивления.

На рис. 3 даны температурные зависимости сопротивления для одного из образцов $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ при внешних напряжениях $U = 51 мВ$ (кривая 1), $U = 1,4 В$ (кривые 2 и 2а) и $U = 1,8 мВ$ (кривые 3 и 3а). При напряжении $U = 51 мВ$ ($U < U_s$) из-за малого различия кривых, измеренных при $+dT/dt$ и $-dT/dt$, на рисунке приведена только одна кривая, измеренная при $+dT/dt$. Из рисунка видно, что с ростом температуры от 4,2 К до 60 К при $U = 51 мВ$ сопротивление образца практически оставалось неизменным до $T \cong 15 К$, а выше $T = 15 К$ уменьшалось по степенному закону

$$R = A(U)T^{-6} \tag{1}$$

вплоть до $T \cong T_c$ (кривая 1 на рис. 3). Из температурных зависимостей подвижности и концентрации, измеренных в парафазе, установлено, что в слабом поле зависимость

сопротивления от температуры определялась температурными изменениями концентрации, подвижности и диэлектрической проницаемости.

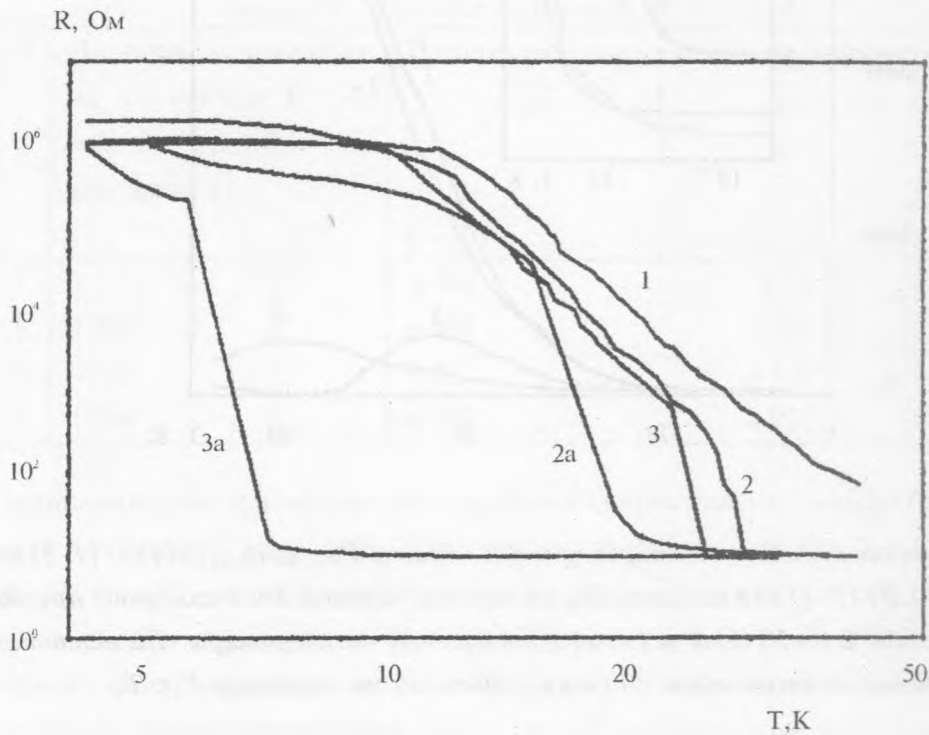


Рис. 3. Сопротивление образца $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ в области температур $4,2 \sim 50$ К при напряжении на контактах 4 – 5: (1) 0,51 мВ (нагревание); (2) 1,4 В (нагревание), (2a) 1,4 В (охлаждение), (3) 1,8 В (нагревание), (3a) 1,8 В (охлаждение).

При $U > U_s$ (кривые 2 и 3) и $T = 4,2$ К сопротивление росло с увеличением U . При повышении температуры сопротивление по-прежнему уменьшалось сначала медленно, а при $T > 10 - 15$ К вновь падало согласно (1), но при меньшем значении константы $A(U)$.

Вблизи T_c вместо плавного увеличения сопротивления, которое имело место при $U < U_s$ (кривая 1), при $U > U_s$ сопротивление скачком уменьшалось до минимального значения, которое наблюдалось при $U < U_s$ в парафазе материала.

Из сопоставления кривых 1 – 3 следует, что уменьшение сопротивления при $T > 10$ К не связано с тепловым разогревом образца, так как, во-первых, оставалась неизменной зависимость R от T , во-вторых, отклонение R от величины, которая была измерена в слабом поле, происходило при слишком малой величине вводимой в образец мощности.

(1,5 – 2 мкВм) и, в-третьих, падение сопротивления вблизи T_c было слишком резким (скачкообразным).

При обратном ходе $-dT/dt$ из-за малого сопротивления образцов при высоких температурах влияние джоулева разогрева на изменение сопротивления в сильном электрическом поле было уже существенным, поэтому температурные зависимости сопротивления (кривые 2а и 3а) принципиально отличались от тех, которые были получены при повышении температуры от 4,2 К. Тем не менее, скачки сопротивления на 4 – 5 порядков при изменении температуры всего на 2 – 3 градуса, которые наблюдались при $-dT/dt$, сложно объяснить простым изменением концентрации и подвижности из-за разогрева образца. Поэтому попытки объяснить полученные данные только полупроводниковыми свойствами $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ без учета фазового перехода в этом материале не оказались успешными, и для объяснения полученных данных использовалось представление о возникновении многодоменной структуры в сегнетофазе и ее изменении под действием электрического поля. Разбиение в сегнетофазе на домены возможно даже в однородном по составу образце, тем более это реально в исследуемых образцах, так как использованные контакты не совсем омичны и представляют собой плохой барьер Шоттки. Из-за огромных значений диэлектрической проницаемости вблизи T_c даже очень слабое электрическое поле барьера является достаточно сильным, чтобы определять ориентацию спонтанной поляризации и быть зародышем доменной структуры. В свою очередь, доменная структура может быть источником спонтанного напряжения [6]. Так как при низких температурах в закрытых от внешнего излучения образцах $Pb_{0,78}Sn_{0,22}Te(In)$ концентрации свободных носителей малы [3], а константа Кюри-Вейсса велика [8], то возможно, что в экранировке спонтанной поляризации большую роль могут играть глубокие примесные или дефектные центры, как объемные [7], так и поверхностные, концентрации которых в исследуемом материале весьма значительны. Величина и неоднородное распределение спонтанного напряжения по длине образца при $T = 4,2$ К являлись косвенным доказательством того, что образец разбит на домены, то есть представляет собой многодоменную структуру. Непрозрачность образцов $Pb_xSn_{1-x}Te(In)$ в видимой области спектра и низкие температуры, при которых образец находится в сегнетофазе, не позволили визуально наблюдать доменную структуру и ее изменение в электрическом поле, например, с помощью жидких кристаллов, как это было сделано в ТГС [9].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (94-02-05849а) и Программы МНТП (1-043).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ichiguchi T. and Drew H. D. Proc. 17th International Conference on the Physics of Semiconductors, San Francisco, 1984, p. 1393.
- [2] Вул Б. М., Воронова И. Д., Калюжная Г. А., и др. Письма ЖЭТФ, **19**, N 1, 21 (1979).
- [3] Вул Б. М., Гришечкина С. П., Рагимова Т. Ш. ФТП, **21**, в. 6, 1054 (1987).
- [4] Воронова И. Д., Семенова Е. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7, 19 (1987).
- [5] Неггманн Р. Н. and Моллманн К.-Р. Phys. Stat. Sol. (a), **80**, N 1, K101 (1983).
- [6] Sandomirskii V. B., Khalilov Sh. S., and Chensky E. V. Ferroelectrics, **43**, N 3-4, 147 (1982).
- [7] Гришечкина С. П., Воронова И. Д. ФТТ, **37**, N 9, 2732 (1995).
- [8] Виноградов В. С., Кучеренко И. В. ФТП, **33**, N 9, 2516 (1991).
- [9] Ivanov N. R. Abstracts of Papers, V Russian-Japanese Symposium on Ferroelectricity, Moscow, August 22-27, 1994, p. 87.

Поступила в редакцию 20 января 1997 г.