

ма значение $d\sigma/dP$ в области давлений от 10^{-7} до 10^{-4} Тор изменялось от $-2 \cdot 10^{15}$ до $-1 \cdot 10^{13}$ дин·см $^{-2}$ ·Тор $^{-1}$ и резко уменьшалось по модулю при дальнейшем увеличении давления.

Как видно из (7), на значение $T_{кр}$ в пленке оказывают влияние два независимых фактора: деформация в объеме (определяет $T_{кр}^{об}$) и деформация вследствие взаимодействия с подложкой (определяет сдвиг $T_{кр}^{\sigma}$) (см. также (10)). В данной упрощенной модели при значениях параметров, использовавшихся выше, $T_{кр}^{об} \sim 500$ К при $n = 10^{22}$ см $^{-3}$ и фазовый переход имеет характер перехода второго рода. Указанные недостатки могут быть устранены путем учета электрон-электронного взаимодействия [4]. Однако это не влияет на взаимодействие пленки с подложкой, поэтому приведенные результаты по сдвигу $\Delta T_{кр}$ остаются в силе.

Авторы благодарят В. Ф. Киселева за интерес к работе и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Левшин Н. Л., Смирнов Н. И. // ФТТ. 1988. 30, № 3. С. 924. [2] Martinz H. P., Abergmann R. A. // Thin Solid Films. 1982. 89. P. 133. [3] Киселев В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. М., 1970. С. 212—216. [4] Бугаев А. А., Захарченя Б. П., Чудновский Ф. А. Фазовый переход металл—полупроводник и его применение. Л., 1979. [5] Гоффман Р. Х. // Физика тонких пленок. М., 1968. Т. 3. С. 225. [6] Емельянов В. И. // Тр. 4-го Междунар. симп. по избр. проблемам стат. механики. Дубна, 1988. С. 119.

Поступила в редакцию
08.04.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 6

УДК 621.315.592

СОСТОЯНИЕ ДИПОЛЬНОГО СТЕКЛА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ PbGeTeSe, СОСТАВЛЕННЫХ ПО РАЗРЕЗУ PbSe — GeTe

А. И. Лебедев, И. А. Случинская

(кафедра физики полупроводников)

В образцах n -Pb $_{1-x}$ Ge $_x$ Te $_{1-y}$ Se $_y$ с $y \approx 1$ и концентрацией Ge, меньшей пороговой для возникновения сегнетоэлектричества, наблюдается низкотемпературное рассеяние электронов, объясняемое появлением в кристаллах неупорядоченной дипольной структуры типа дипольного стекла.

Проведенные ранее исследования твердых растворов PbGeTeSe, составленных по разрезу (Pb $_{1-x}$ Ge $_x$) $_{1-y}$ (Pb $_{1-z}$ Ge $_z$ Se) $_y$ ($x, z \leq 0,08$) [1, 2], обнаружили в них низкотемпературный сегнетоэлектрический фазовый переход (ФП), связанный с упорядочением дипольных моментов нецентральных примесей (НП) Ge [3]. В образцах Pb $_{1-x}$ Ge $_x$ Te $_{1-y}$ Se $_y$ с невысоким содержанием Ge ($x < 0,04$) [1] были обнаружены сильное дополнительное рассеяние электронов ниже некоторой температуры T_g и подавление ФП в области составов $y = 0,7—0,95$. Эти явления связывались с переходом системы НП в стеклообразное состояние, которое возникает из-за понижения симметрии локального окружения НП и нарушения эквивалентности их различных смещений. Появляющаяся при этом неупорядоченную дипольную структуру в соответствии с принятой классификацией следует отнести к замороженному дипольному беспорядку (*quenched dipolar disorder*).

В настоящем сообщении мы покажем, что в твердых растворах Pb $_{1-x}$ Ge $_x$ Te $_{1-y}$ Se $_y$ с $1-y \approx 0$, где роль замороженных случайных полей невелика, возникающая при низких температурах неупорядоченная дипольная структура по типу может быть отнесена к дипольному стеклу, свойства которого определяются спецификой взаимодействия хаотично расположенных в решетке дипольных моментов НП.

В работе исследовались поликристаллические образцы Pb $_{1-x}$ Ge $_x$ Te $_{1-y}$ Se $_y$, составленные по разрезу (PbSe) $_{1-x}$ (GeTe) $_x$ ($x \leq 0,15$) и отожженные в течение 120—220 ч

при 620°C [4]. Методика электрических и диэлектрических измерений была аналогична описанной в работах [5, 6].

Для образцов p -PbGeTeSe, как и для изученных в [7] кристаллов p -Pb_{1-x}Ge_xSe, были характерны сильное рассеяние дырок и зависимость их концентрации от температуры и состава, что затрудняло изучение свойств дипольной системы

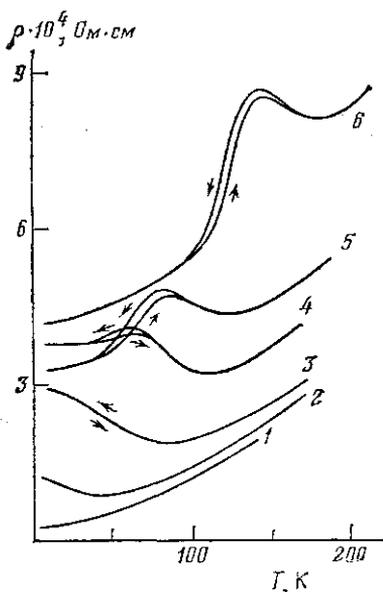


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образцов n -(PbSe)_{1-x}(GeTe)_x с $x = 0,015$ (1); 0,025 (2); 0,035 (3); 0,05 (4); 0,06 (5) и 0,10 (6). Стрелками указано направление изменения температуры при записи кривых

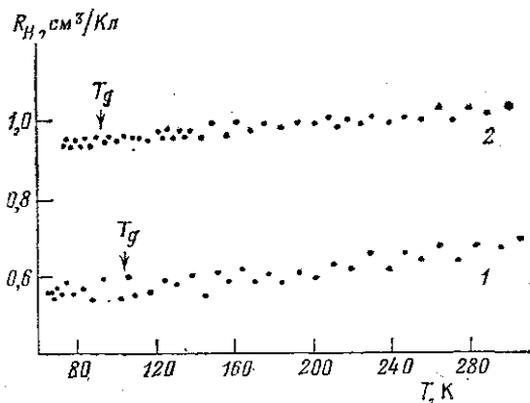


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла для двух характерных образцов: Pb_{0,95}Ge_{0,05}Te_{0,05}Se_{0,95} (1) и Pb_{0,966}Ge_{0,034}Te_{0,38}Se_{0,62} (2). Стрелками указаны значения температуры T_g

электрическими методами. Поэтому основные измерения были выполнены на образцах n -типа проводимости.

Температурные зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ образцов p -PbGeTeSe показаны на рис. 1. Поскольку холловская концентрация электронов в этих

x	$R_H, \text{см}^2/\text{Кл}$		$n, \text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	
	300 К	77 К	300 К	77 К
0,015	1,10	1,13	1350	13 000
0,025	1,05	0,97	1340	8 800
0,035	0,78	0,64	1100	3 400
0,050	0,70	0,62	760	1 620
0,060	0,63	0,53	660	1 120
0,075	0,76	0,61	680	1 180
0,100	0,75	0,65	570	1 240
0,125	1,00	0,94	560	1 160

вырожденных образцах медленно изменяется при возрастании x (таблица) и слабо зависит от температуры (в частности, как видно из рис. 2, не имеет особенностей в окрестности T_g), эти кривые позволяют судить о рассеянии электронов в кристаллах.

Кривые $\rho(T)$ (см. рис. 1) показывают, что при увеличении x появляется и быстро возрастает дополнительное низкотемпературное рассеяние электронов. Дальнейшее увеличение x приводит к ослаблению этого рассеяния и появлению на кривых $\rho(T)$ быстро сдвигающегося в область высоких температур пика, связанного с рассеянием электронов на флуктуациях поляризации вблизи точки сегнетоэлектрического ФП T_c . (Сегнетоэлектрический характер этого ФП доказывается появлением максимумов на температурных зависимостях емкости $p-n$ -переходов $C(T)$, смещенных относительно пиков аномального рассеяния в область более высоких температур.)

Из описанных результатов следует важный вывод: низкотемпературная особенность в рассеянии характерна для образцов с концентрацией НП, при которой еще не возникает сегнетоэлектрический дальний порядок. Появление этой особенности не может быть связано с поликристаллической структурой образцов, поскольку аналогичные кривые $\rho(T)$ были получены и на специально выращенных методом сублимации монокристаллах. Таким образом, низкотемпературная особенность обусловлена появлением некоего нового механизма рассеяния в кристаллах с НП и может быть связана с рассеянием электронов на случайном потенциале, возникающем при переходе системы НП в кристалле в состояние дипольного стекла при $T \approx T_g$ [1].

Размытый характер особенности около T_g , по-видимому, можно объяснить тем же обстоятельством, что и в спиновых стеклах: размерность реальных кристаллов ($d=3$) оказывается меньше нижней критической размерности ($d_c=4$), при которой в системах с конечным радиусом взаимодействия еще может возникнуть резкий ФП в состоянии дипольного стекла [8].

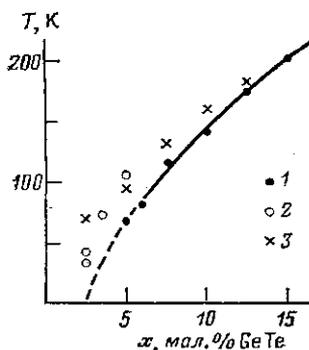


Рис. 3. Зависимость температур T_c (1), T_g (2) и температуры максимума на зависимостях $C(T)$ (3) от параметра состава твердого раствора $(\text{PbSe})_{1-x}(\text{GeTe})_x$.

Интересным результатом работы оказалась зависимость температур T_g и T_c от параметра состава x . На рис. 3 приведены значения температур T_g , определенных по точке пересечения экстраполированных низко- и высокотемпературных участков кривых $\rho(T)$, значения T_c и значения температур, отвечающих максимумам на кривых $C(T)$. Видно, что обе зависимости — $T_c(x)$ и $T_g(x)$ — носят пороговый характер ($T \sim (x-x_c)^{\beta}$), который может свидетельствовать о проявлении кооперативных эффектов при обоих переходах. Теоретические расчеты [9] предсказывали подобную зависимость для дипольных стекол с показателем $\beta \approx 0,66$. Аналогичная степенная зависимость для $T_c(x)$ с $\beta=2/3$, полученная в теоретической работе [10], соответствует экспериментальным данным для $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$ [11]. Предположив, что $\beta=2/3$, из зависимости $T_g(x)$ и $T_c(x)$ мы нашли «критические» концентрации для возникновения фазы дипольного стекла ($x_c=0,019$) и сегнетоэлектрической фазы ($x_c=0,025$).

Мы считаем, что в отличие от изученных в [1, 2] образцов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$ в наших образцах возникает фаза дипольного стекла, поскольку из-за малой концентрации атомов Te в них трудно ожидать сильного проявления замороженных случайных полей [6]. В пользу этого говорят и то, что зависимости $T_g(x)$ и $T_c(x)$, аналогичные нашим, характерны и для твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Se}$ [12], в которых вообще не должен возникать замороженный дипольный беспорядок. Возможная взаимная корреляция в расположении атомов Ge и Te (ближний порядок), однако, может сильно повлиять на характер упорядочения НП, увеличивая при этом степень замороженного дипольного беспорядка. Для выяснения роли этой корреляции была проведена дополнительная термообработка образцов при 490°C ; она показала, что в образцах немного возрастает низкотемпературное рассеяние, пик аномального рассеяния становится менее выраженным, хотя температуры T_g и T_c почти не изменяются. Это позволяет заключать, что влияние эффектов ближнего порядка на свойства изученных образцов сравнительно невелико.

Интересно, что в образце с $x=0,025$, в котором экстраполированное значение $T_c=0$, максимум на зависимости $C(T)$ лежит даже выше T_g (около 70 К). Это указывает на возможность появления в фазе дипольного стекла сегнетоэлектрического ФП, индуцированного сильным электрическим полем $p-n$ перехода. Кстати, по-видимому, именно это поле не позволяет нам наблюдать какие-либо особенности на кривых $C(T)$ в окрестности температуры T_g .

В заключение авторы благодарят Б. Е. Вугмейстера за плодотворное обсуждение результатов и В. П. Зломанова за интерес к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Лебедев А. И., Случинская И. А. // Письма в ЖЭТФ. 1987. 46, № 11. С. 425. [2] Козловский В. Ф., Лебедев А. И. // ФТТ. 1988. 30, № 2. С. 531. [3] Islam Q. T., Bunker V. A. // Phys. Rev. Lett. 1987. 59, N 23. P. 2701. [4] Абрикосов Н. Х., Авилов Е. С., Карпинский О. Г. и др. // Изв. АН СССР, Неорг. материалы. 1985. 21, № 10. С. 1664. [5] Абдуллин Х. А., Лебедев А. И. // ФТТ. 1983. 25, № 12. С. 3571. [6] Лебедев А. И., Случинская И. А. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1987. 51, № 10. С. 1683. [7] Прокофьева Л. В., Зарубо С. В., Виноградова М. Н. и др. // ФТП. 1982. 16, № 12. С. 2136. [8] Коренблит И. Я., Шендер Е. Ф. // Изв. вузов. Физика. 1984. № 10. С. 23. [9] Fischer V., Klein M. W. // Phys. Rev. Lett. 1976. 37, N 12. P. 756. [10] Литвинов В. И. // ФТТ. 1987. 29, № 7. С. 2206. [11] Takano S., Kumashiro Y., Tsuji K. // J. Phys. Soc. Jap. 1984. 53, N 12. P. 4309. [12] Козловский В. Ф., Лебедев А. И., Петров Ю. Е. // ФТТ. 1986. 28, № 12. С. 3610.

Поступила в редакцию
25.04.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29. № 6

Поправки к статье Солодухина С. Н. «Струны и антисимметричные тензорные поля» (Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3, Физика. Астрономия. 1988. 29, № 3. С. 78)

На стр. 81 следует внести изменения.

- 1) В 8-й строке сверху $\det \Delta_1$ заменить на $\det L$, где оператор $L\xi^\mu = (L_\nu^\mu)\xi^\nu = (-\nabla_\alpha \nabla^\alpha \delta_\nu^\mu + [\nabla^\mu, \nabla_\nu])\xi^\nu$.
- 2) В формуле (10) $\det \Delta_1$ заменить на $\det L$;
 $[\det(d-\delta)]^N$ заменить на $[\det(d-\delta)]^{N/2}$.
- 3) Последний абзац (с 15-й строки сверху) заменить на следующий:
 Поскольку $\det \Delta_1 = (\det \Delta_0)^2 (\det \Delta_2)^2$ и $\det \Delta_0 = \det \Delta_2$, находим, что условием отсутствия конформной аномалии является $N=8$. К сожалению, это значение не даст размерности $D=4$ для пространства-времени (напомним, что в данной модели $D=4N$).