

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ФАЗЫ ДИПОЛЬНОГО СТЕКЛА В ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ГРУППЫ $A^4B^6$

А.И.Лебедев, И.А.Случинская

Дополнительное рассеяние электронов, характерное для фазы дипольного стекла (ДС), обнаружено при изучении электропроводности  $Pb_{1-x}Ge_xTe_{1-y}Se_y$  и ряда других твердых растворов. Появление фазы ДС в твердых растворах объяснено разупорядочивающим влиянием их статистической структуры на характер упорядочения диполей.

Изучение кооперативных явлений в неупорядоченных системах в настоящее время вызывает большой интерес. Известно, что введение нецентральных примесей (НП) в сильно поляризуемые матрицы приводит к появлению сегнетоэлектрической фазы<sup>1</sup>; возможность появления в таких системах состояния ДС практически не исследована. В настоящей работе на основании изучения электропроводности полупроводника – сегнетоэлектрика  $Pb_{1-x}Ge_xTe_{1-y}Se_y$  предположено образование фазы ДС, устойчивой в довольно широком интервале температур.

Напомним, что состояние ДС в кристалле характеризуется конфигурационными средними  $\overline{P} = 0$ ,  $\overline{P^2} \neq 0$ , причем согласно теории молекулярного поля, параметр порядка  $P^2$  ниже температуры перехода  $T_g$  изменяется пропорционально  $T_g - T$ <sup>1</sup>. В отличие от спиновых стекол (в которых переход парамагнетик – спиновое стекло слабо проявляется в электропроводности), появление фазы ДС должно сопровождаться сильными эффектами рассеяния. Действительно, появление при  $T < T_g$  хаотически изменяющейся в пространстве поляризации порождает случайное электрическое поле, которое и воздействует на движение свободных носителей.

Рассмотрим характеристики этого рассеяния. Решая уравнение Пуассона в  $k$ -пространстве с учетом экранирования, найдем потенциал взаимодействия электрона с замороженной волной поляризации с волновым вектором  $q$ :

$$V_q = -e\varphi_q = \frac{4\pi e(q \cdot P_q)}{\epsilon(q^2 + q_0^2)}, \quad q_0^2 = \frac{4m^* e^2}{\epsilon \hbar^2} \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{1/3}$$

Мощность флуктуаций  $\overline{P_q P_{-q}}$  выражается через фурье-компоненты корреляционной функции, которую мы будем считать равной  $P(0)P(r) = P^2 \exp(-q_D r)$ , где  $q_D = 1/r_D$  опре-

деляется характерным размером "домена"  $r_D$ . Рассеяние на таком потенциале является упругим; расчет вклада этого механизма рассеяния в величину удельного сопротивления  $\rho(T)$  вырожденного полупроводника, выполненный в рамках кинетического уравнения, дает в предельных случаях  $q_D \gg k_F$  и  $q_D \ll q_0$  ( $k_F$  — волновой вектор электрона на поверхности Ферми) следующие зависимости  $\Delta\rho$  от концентрации электронов  $n$  и температуры:  $\Delta\rho \sim q_D^{-3} (T_g - T)n^{-4/3}$  и  $\Delta\rho \sim q_D(T_g - T)n^{-7/3}$ . Заметим, что такие же характеристики должны наблюдаться и при рассеянии электронов на доменных стенках в сегнетоэлектрике; в этом случае  $T_g$  должна совпадать с температурой сегнетоэлектрического фазового перехода (ФП)  $T_c$ . Именно такое дополнительное рассеяние ( $\Delta\rho \sim (T_c - T)n^{-2}$ ) было обнаружено в образцах  $\text{PbTe}_{1-x}\text{S}_x$  в работе <sup>2</sup>.

Изучение четвертого твердого раствора  $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}_{1-y}\text{Se}_y$  выявило ряд новых необычных особенностей, позволяющих предположить появление в нем фазы ДС. Состав образцов отвечал формуле  $(\text{Pb}_{0,975}\text{Ge}_{0,025}\text{Te})_{1-z}(\text{Pb}_{0,96}\text{Ge}_{0,04}\text{Se})_z$  ( $z$  — параметр состава) и выбирался так, что температура сегнетоэлектрического ФП, рассчитанная в приближении молекулярного поля, должна была оставаться неизменной. Изучались отожженные поликристаллы  $n$ -типа проводимости.

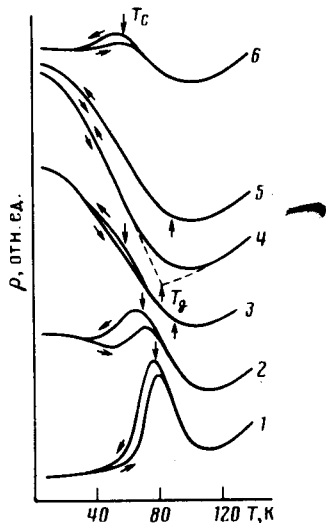


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления образцов  $\text{PbGeTeSe}$ .  $z$ : 1 — 0,36; 2 — 0,52; 3 — 0,62; 4 — 0,76; 5 — 0,85; 6 — 0,975. Кривые произвольно сдвинуты вдоль вертикальной оси. Стрелками у кривых указано направление изменения температуры при записи. Вертикальными стрелками отмечены значения температур  $T_c$  и  $T_g$ .

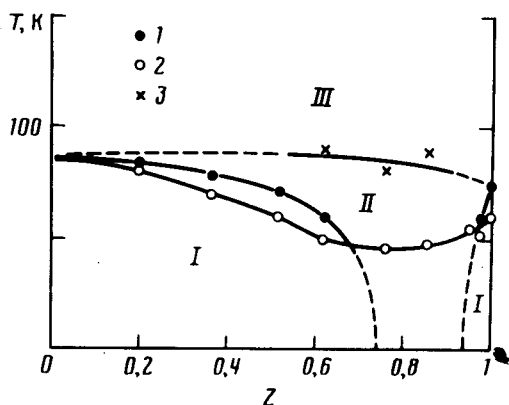


Рис. 2. Фазовая диаграмма изученной системы  $\text{PbGeTeSe}$ . I — сегнетофаза, II — фаза ДС, III — парафаза. Точками обозначены значения  $T_c$  (1), температуры, отвечающей максимальному гистерезису на кривых (2), и  $T_g$  (3).

Температурные зависимости  $\rho(T)$  для нескольких образцов показаны на рис. 1. Выше 120 — 140 К зависимости  $\rho(T)$  типичны для полупроводников группы  $A^4B^6$  и определяются взаимодействием электронов с фононами. Ниже появляется дополнительное рассеяние, состоящее из двух слагаемых: "резонансного" пика, объясняемого рассеянием на флуктуациях поляризации в окрестности  $T_c$ , и приблизительно линейного возрастания  $\rho$  с понижением  $T$ , которое мы связываем с рассмотренным выше механизмом рассеяния. Значения  $T_g$ , определенные по точке пересечения экстраполированных линейного низкотемпературного и высокотемпературного участков кривых (штриховые линии на рис. 1), существенно (на 20 — 40 К) отличаются от  $T_c$ . Это позволяет предположить, что в области  $T_c < T < T_g$  в кристаллах образуется фаза ДС, а ниже  $T_c$  в них сосуществуют сегнетофаза и ДС. Кривые

$\rho(T)$ , записанные при нагревании и охлаждении, не совпадают; релаксации  $\rho$ , наблюдаемые после охлаждения образца через температуру  $T_c$ , свидетельствуют о том, что ниже  $T_c$  фаза ДС является метастабильной и НП стремятся сегнетоэлектрически упорядочиться.

В области  $z = 0,75 - 0,95$  особенность при  $T_c$  вообще не обнаруживается (см. также рис. 2). Этот результат неожиданен, поскольку оба исходных твердых раствора ( $z = 0$  и 1) испытывают идентичные сегнетоэлектрические ФП<sup>3</sup> и в системе не должно быть конкурирующих взаимодействий. Исследование емкости  $p - n$ -перехода, изготовленного из одного из таких образцов ( $z = 0,78$ ), обнаружили сильную дисперсию диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и сдвиг температуры максимума  $\epsilon'$  с частотой, указывающие, что возникновение сегнетофазы в образцах сильно заторможено кинетически.

Особенности в электропроводности, аналогичные описанным, были обнаружены нами и в других четверных твердых растворах ( $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-y}S_y$ ,  $Pb_{1-x}Ge_xTe_{1-y}S_y$ ,  $PbTe_{1-x-y}Se_xS_y$ ), а также в  $Pb_{1-x}Ge_xSe$ <sup>3</sup>, в котором сильное дополнительное рассеяние наблюдалось при  $x \lesssim 0,04$  (когда  $T_c < T_g$ ) и исчезало при больших  $x$ .

Появление фазы ДС при упорядочении дипольных моментов НП в твердых растворах не случайно. Действительно, статистический беспорядок в расположении атомов в твердом растворе нарушает эквивалентность различных смещений НП и приводит к появлению в кристалле замороженного случайного поля, сопряженного параметру порядка<sup>4</sup>. При  $T \approx T_g$  это случайное поле вызывает зарождение разупорядоченной дипольной структуры — ДС. Устойчивые области полярной фазы могут появиться в кристалле только тогда, когда величина молекулярного поля окажется больше случайного поля. Ясно, что чем сильнее будет последнее (т. е. чем сильнее будет статистический беспорядок), тем при более низкой температуре возможен сегнетоэлектрический ФП; при низких  $T_c$  вероятность образования критического зародыша сегнетофазы в фазе ДС может оказаться столь малой, что полярная фаза вообще не будет появляться.

#### Литература

1. Вугмейстер Б.Е., Глинчук М.Д. УФН, 1985, 146, 459.
2. Абдуллин Х.А., Демин В.Н., Лебедев А.И. ФТТ, 1986, 28, 1020.
3. Козловский В.Ф., Лебедев А.И., Петров Ю.Е. ФТТ, 1986, 28, 3610.
4. Лебедев А.И., Случинская И.А. Изв. АН СССР, сер. физ., 1987, 51, 1683.