

РЕЛАКСАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В  $Pb_{1-x}Ge_xTe$ 

С.П. Грищечкина, А.Т. Лупу

*Показано, что как в параэлектрической, так и в сегнетоэлектрической фазах  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  значительный вклад в диэлектрическую проницаемость дает кооперативное взаимодействие диполей, энергия переориентации которых близка к ширине запрещенной зоны материала данного состава, а времена релаксации сильно зависят от электрического поля. Полученные результаты не позволяют связать наблюдающийся диполь с нецентральной ионом германия в данном материале.*

$Pb_{1-x}Ge_xTe$  принадлежит к полупроводникам-сегнетоэлектрикам, в которых температура  $T_c$  фазового перехода из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу зависит от состава. Зависимость  $T_c$  от состава в этом материале характеризуется резким и нелинейным ростом ее при малых значениях  $x$ . Подобные изменения  $T_c$  в зависимости от концентрации вводимых в материал центров замещения наблюдались ранее, например, в  $KTaO_3:Li(Na)/1-4/$ . Там же показано, что полученные особенности можно объяснить взаимодействием с решеткой диполей, возникающих при замене атома К на Li или Na.

Поэтому в ряде работ [3,5-7] было выдвинуто предположение о возникновении аналогичных диполей в  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  при замене атома Pb атомом Ge. На этом предположении построено объяснение резкой зависимости  $T_c$  от состава, аномалий изменения сопротивления вблизи  $T_c$  [5] и температурного хода теплоемкости [6,7].

Наличие диполей, а также особенности их взаимодействия с решеткой, как правило, проявляются при изучении частотных и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости в диапазоне радиочастот, так как характерные времена переориентации диполя велики. Однако из-за большой электропроводности  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  прямые измерения низкочастотной диэлектрической проницаемости реально можно проводить лишь двумя методами: путем изучения условий распространения магнитоплазменных волн в материале при разных температурах [8] или путем измерения зависимости от температуры и смещения емкости барьеров Шоттки и р-п переходов [9].

Сопоставление полученных к настоящему времени зависимостей  $\epsilon$  от  $T$ , в том числе и вычисленных из температурной зависимости удельного сопротивления материала вблизи  $T_c$ , указывает на существование дополнительного вклада в диэлектрическую проницаемость медленно протекающих процессов. Поэтому задачей данной работы было изучение именно низкочастотного вклада в диэлектрическую проницаемость, для чего проводились измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 90 кГц до 900 Гц. Исследования проводились путем измерения С-Т и С-V характеристик р-п переходов на основе  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  ( $0 \leq x \leq 0,1$ ). Уже в первых работах, посвященных изучению температурной зависимости емкости барьеров Шоттки и р-п переходов на основе  $Pb_{1-x}Ge_xTe$ , отмечалось существование наряду с основным максимумом емкости при  $T = T_c$  спутанных максимумов, величина которых и положение на температурной оси резко зависят от смещения и частоты [9,10].

Иллюстрацией принципиального различия в поведении максимума емкости при  $T_c$  (отмечен стрелкой) и вблизи 120-140 К при изменении частоты и смещения на р-п переходе может служить рис. 1, на котором представлено семейство кривых  $C(T)$  при нескольких значениях смещения на р-п переходе и двух частотах измерительного сигнала.

Даже качественное сравнение кривых, измеренных при одинаковом смещении, но при разных частотах, показывает, что и величина, и положение на температурной оси максимума вблизи  $T_c$  практически не зависят от частоты, в то время как для второго максимума эти величины являются функциями частоты. Следует отметить еще одну особенность максимума вблизи 120-140 К: наличие сильного температурного гистерезиса величины температуры этого максимума. В окрестности же  $T_c$  кривые  $C(T)$ , измеренные как при понижении, так и при повышении температуры образцов, совпадали.

Так как настоящая работа посвящена изучению именно зависящего от частоты максимума емкости (ЧМЕ), то закономерности изменения максимума при  $T_c$  использовались только для получения параметров конкретных р-п переходов.

На рис. 1 показаны температурные зависимости емкости в окрестности ЧМЕ при различных частотах, измеренные при охлаждении образца и постоянном смещении на р-п переходе. Видно, что при увеличении частоты емкость в максимуме уменьшается, а температура максимума  $T_{\max}$  растет. Зависимость температуры ЧМЕ от частоты и смещения на р-п переходе  $V_b$  можно проследить на примере образца  $Pb_{0,942}Ge_{0,058}Te$ , результаты измерения которого приведены на рис. 2. Видно, что связь между частотой и температурой, при которой наблюдался ЧМЕ, удовлетворительно описывается законом Аррениуса  $\nu = \nu_0 \exp(-U/kT)$ , где  $U$  — некоторая постоянная, имеющая размерность энергии,  $\nu_0$  — константа с размерностью частоты. При изменении смещения на р-п переходе наклон прямых  $\ln \nu$  ( $10^3/T_{\max}$ ) практически постоянен, а величина  $\nu_0$  резко уменьшается при подаче положительного смещения.

Область температур, где проявляется ЧМЕ, слабо зависит от состава материала. Качественно зависимости ЧМЕ от частоты и смещения были одинаковы как в пара-, так и в сегнетофазе  $Pb_{1-x}Ge_xTe$ , величины же  $U$  и  $\nu_0$  в сегнетофазе были значительно больше.

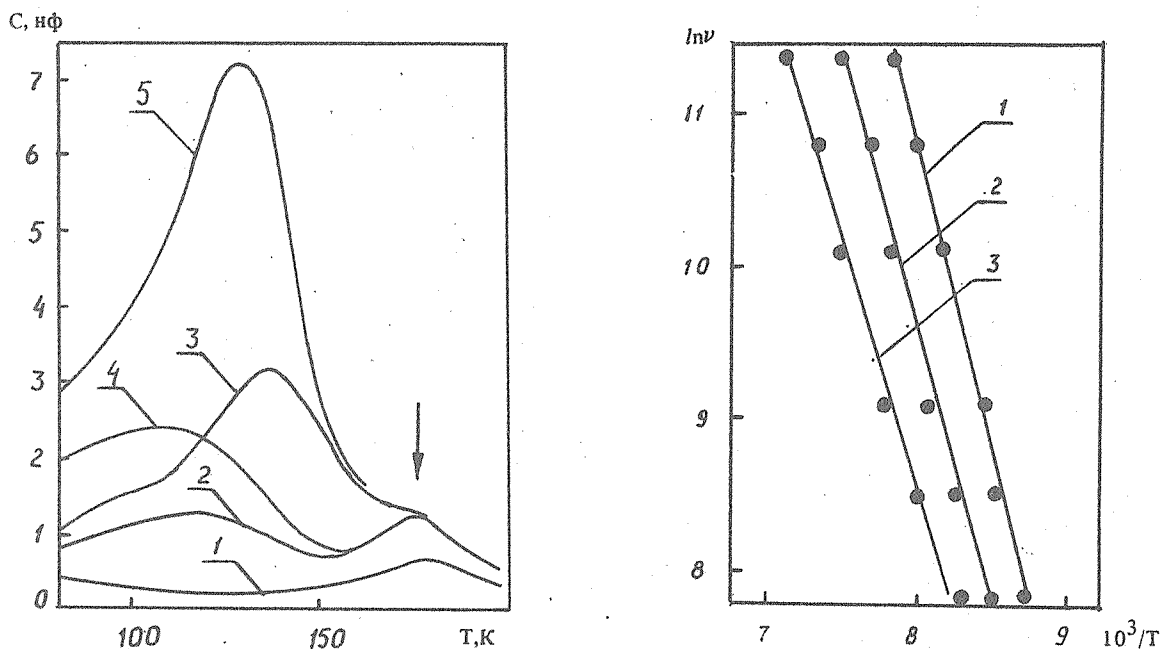


Рис. 1. Температурная зависимость емкости р-п перехода  $Pb_{0,942}Ge_{0,058}Te$  при частотах измерительного сигнала  $\nu = 90$  кГц (1,2,3), 9 кГц (4,5) и смещениях  $V_b = 300$  мВ (1), 0 мВ (2,4), +150 мВ (3,5).

Рис. 2. Зависимость  $\ln \nu$  от  $1/T_{\max}$  для образца  $Pb_{0,942}Ge_{0,058}Te$  при смещениях  $V_b = +100$  мВ (1); +150 мВ (2), +300 мВ (3).

Следует отметить, что из-за высокой электропроводности исходного полупроводника выводы о зависимости  $U$  и  $\nu_0$  от частоты и смещения относятся только к тому ограниченному диапазону изменения частоты и смещения на р-п переходе, где были возможны корректные измерения.

Некоторые закономерности изменения ЧМЕ аналогичны тем, которые возникают при дебаевской релаксации изолированных диполей, однако все полученные результаты можно объяснить, если предположить, что мы имеем дело с фазовым переходом типа порядок-беспорядок в системе с двухъямным потенциалом.

Как видно из рис. 1, с высокотемпературной стороны от максимума величина ЧМЕ уменьшается с ростом температуры значительно быстрее, чем  $1/T$ , как было бы при дебаевской релаксации изолированного диполя. Это наблюдается как в сильном ( $V_b = 0$ ), так и в слабом (когда  $V_b$  близко к контактной разности потенциалов) электрических полях.

Как было показано в работе [11], в кристаллах с высокой поляризуемостью при достаточно большой концентрации дефектов их взаимодействие может иметь кооперативный характер. Так как  $Pb_{1-x}Ge_xTe$  относится к материалам такого типа, то подобная ситуация вполне допустима. При таком предположении становятся объяснимыми полевые зависимости величины и формы ЧМЕ. Действительно, при уменьшении электрического поля (положительное смещение на  $p-n$  переходе) должна расти диэлектрическая проницаемость и может ослабевать кооперативный эффект из-за уменьшения ориентирующего действия поля.

В этом случае константу  $U$  можно рассматривать как энергию, разделяющую два равновесных состояния атома или дефекта в данной решетке, а постоянная  $\nu_0$  должна характеризовать собственные колебания атома в минимуме энергии. Сопоставление полученных значений  $U$  с характерными значениями энергии в исследуемых образцах указывает на то, что  $U$  всегда меньше, чем ширина запрещенной зоны исходного материала, но может быть как меньше, так и больше контактной разности потенциалов в  $p-n$  переходах, что косвенно подтверждает отсутствие зависимости  $U$  от электрического поля  $p-n$  перехода.

Величина  $\nu_0$  оказалась очень резкой функцией электрического поля (рис. 2), и только в слабом электрическом поле для образца  $Pb_{0,97}Ge_{0,03}Te$ , где ЧМЕ наблюдается в паразлектрической области, была получена величина  $\nu_0 \approx 4,6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ , которая близка к частотам колебаний изолированного атома. Во всех остальных случаях  $\nu_0 \gg 10^{12} \text{ с}^{-1}$ , поэтому необходимо учитывать полевое изменение  $\nu_0$ . В сильном поле (поле в  $p-n$  переходе может достигать значений  $10^3 - 10^4 \text{ В/см}$ ) зависимость  $\nu_0$  от смещения может быть в грубом приближении описана законом  $\nu_0 = \nu_0(0) + aV^2$ .

Прямой связи емкости ЧМЕ с концентрацией германия в соединении не было обнаружено, поэтому мы не могли связать наблюдающийся фазовый переход с атомом замещения — германием. Возможно, что отсутствие корреляции значений емкости и концентрации германия в материале является следствием неоднозначности связи емкости и концентрации диполей, так как и ширина, и величина электрического поля  $p-n$  перехода зависят от концентрации дефектов и носителей.

Авторы выражают благодарность Собянину А.А. за ценные советы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yasoby Y., Just S. Solid State Commun., 15, 715 (1974).
2. Höchli U.T., Weible H.E., Woather L.A. Phys. Rev.Lett., 41, 1410 (1978).
3. Логачев Ю.А., Мойжес Б.Я. ФТТ, 17, 2209 (1975).
4. Yasoby Y., Holzapfel W.B., Bäuerle O. Solid State Commun., 23, 947 (1977).
5. Katayama S., Murase K. Solid State Commun., 36, 707 (1980).
6. Yaranery H. et al. J. Phys. Ser. C, 14, 441 (1981).
7. Yaranery H., Grassie A., Loram J.W. In: Proc. of 4th Intern. Conference on Narrow-Gap Semiconductors, Linz, 1981. Ed. F. Gornik, Heinrich H., L. Palmeshofer — Berlin; Heidelberg; New-York; Springer — Verlag, 1982.
8. Nishi S., Kawamura H., Murase K. Phys. Status Sol. (b), 97, 581 (1980).
9. Antcliffe G.A., Bate R.T., Buss D.D. Solid State Commun., 13, 1003 (1973).
10. Гришечкина С.П. и др. ФТП, 12, 1132 (1978).
11. Вугмейстер Б.Е., Глинчук М.Д. УФН, 146, 459 (1985).

Поступила в редакцию 8 апреля 1988 г.