

вести непосредственное измерение величины электрической поляризации. Известно, что у сегнетоэлектриков-полупроводников переход в полярную фазу всегда сопровождается скачком энергии активации  $\Delta E$ . На рис. 2 приведена зависимость  $\lg(1/T)$ , из которой видно, что в районе фазового перехода при 350 К наблюдается скачок энергии активации  $\Delta E = 0.11$  эВ.

Таким образом, мы считаем, что в хромите  $\text{CuCr}_2\text{O}_4$ , кроме ферримагнитного упорядочения (150 К), имеет место и зарядовое упорядочение (350 К). Поэтому это соединение можно отнести к сегнетомагнетикам. В данном сегнетомагнетике со структурой шпинели возможность сосуществования спонтанной намагниченности и спонтанной электрической поляризации не находится в противоречии с общими критериями возникновения ферримагнетизма и сегнетоэлектричества. Магнитное упорядочение в таких соединениях возникает в результате обменного взаимодействия, а зарядовое — в результате смещения катионов и лигандов.

Следовательно, полученные результаты для образца  $\text{CuCr}_2\text{O}_4$  подтверждают, что причиной возникновения зарядового упорядочения в хромитах со структурой шпинели является смещение октаэдрических ионов  $\text{Cr}^{3+}$  из центров октаэдров.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

[1] Белов К. П., Горяга А. Н., Шереметьев В. Н. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 42 № 1. С. 37—39.  
 [2] Grimes N. W., Collet A. J. // Phys. St. Sol. (B). 1971. V. 43. N 2. P. 591—596.  
 [3] Ford R. A., Hill O. F. // Spectrochim. Acta. 1960. V. 16. N 11/12. P. 1318—1321.  
 [4] Prince E. // Acta Crystallographica. 1957. V. 10. P. 554.  
 [5] Bertaut E. F., Delorme C. // Acad. Sci. 1954. V. 61. N 239. P. 504.  
 [6] Когутюк И. П., Когутюк П. П., Прядко М. Д. // Изв. вузов, физика. 1985. № 5. С. 26—29.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
Москва

Поступило в Редакцию  
11 мая 1989 г.

УДК 621.315.592

© Физика твердого тела, том 32, в. 1, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 1, 1990

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ ИНДИЯ  
НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ФОТОПРОВОДЯЩИЕ  
СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ—СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ  
 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$**

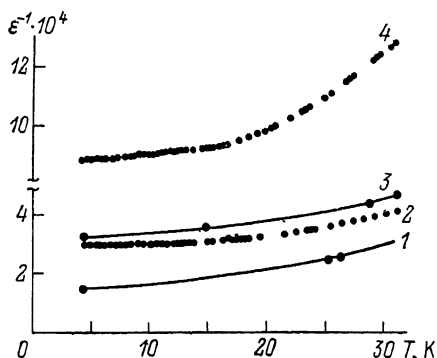
*Б. А. Акимов, В. В. Борщевский, Н. Б. Брандт, Ю. А. Пирогов*

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования влияния примесей на диэлектрические и фотопроводящие свойства полупроводников—сегнетоэлектриков класса  $\text{A}^4\text{B}^6$ . В качестве объекта исследований были выбраны легированные индием и германием сплавы  $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ . Исследования проводились путем измерения зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  от температуры образцов. Измерения осуществлялись в диапазоне СВЧ (17—38 ГГц) волноводно-резонансным методом, основанным на использовании резонансных свойств отрезка волновода, заполненного исследуемым диэлектриком и закороченного металлической пластиной [1].

Полупроводники  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  (In) обладают весьма высокой фоточувствительностью вплоть до дальней области ИК диапазона. Поэтому для подавления внешней фоновой засветки образцов часть волновода перед образцом заполнялась вспененным полистиролом, коэффициент поглощения

которого на СВЧ незначителен, а в ИК диапазоне велик. Необходимые для расчета  $\epsilon$  значения коэффициента отражения СВЧ волны на резонансной частоте определялись с помощью панорамного рефлектометра. Температура образца изменялась с понижением уровня жидкого гелия при выкипании и контролировалась термопарой.

Измерения проводились на образцах с  $x=0.25$ , легированных 0.5 ат. % индия, что соответствовало диэлектрическому состоянию сплавов (концентрация свободных носителей менее  $10^{10}$  см $^{-3}$ ). Моделирование дефектной структуры кристаллов проводилось на образцах с различным содержанием изовалентной примеси германия. Полученные зависимости представлены на рисунке. Для сравнения там же даны зависимости для нелегированных сплавов с  $x=0.25$  и  $0.15$  [2]. Зависимости  $1/\epsilon$  от температуры у сплавов  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  без германия и с содержанием германия 0.01 ат. % совпали. У образцов с 1.0 ат. % германия наблюдалось сильное



увеличение потерь. В исследуемом диапазоне частот дисперсия диэлектрической проницаемости не была обнаружена. Полученные зависимости  $1/\epsilon$  позволяют отнести исследуемые материалы к виртуальным

Температурные зависимости обратной величины диэлектрической проницаемости сплавов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ .

1 и 2 для нелегированных сплавов с  $x=0.25$  и  $0.15$  [2], 3 —  $x=0.25$  с  $0.5$  ат. % индия, 4 —  $x=0.25$  с  $0.5$  ат. % индия и  $0.1$  ат. % германия.

сегнетоэлектрикам: фазовые переходы у них не наблюдаются вплоть до  $T=0$  К. Диэлектрические свойства таких сегнетоэлектриков характеризуются так называемой виртуальной критической температурой  $T_c^B$ , которая по аналогии с обычными сегнетоэлектриками определяется точкой пересечения асимптоты функции  $\epsilon^{-1}(T)$  с осью абсцисс [2]. Введение индия понижает виртуальную критическую температуру  $T_c^B$ , а добавление германия, наоборот, повышает ее: для сплавов с  $x=0.25$  без индия  $T_c^B=-1$  К [2], у легированного только индием сплава  $T_c^B=-30$  К, с германием (0.1 ат. %)  $T_c^B=-26$  К.

При исследовании зависимости комплексной диэлектрической проницаемости от интенсивности ИК излучения в качестве теплового источника излучения использовался описанный выше ИК заграждающий фильтр, расположенный на некотором расстоянии от образца. Температура такого источника излучения, определяющая его интенсивность, контролировалась с помощью термопары. Температура образца была постоянной (4.2 К).

Сравнение экспериментальных данных зависимости величин модуля коэффициента отражения зондирующей СВЧ волны и соответствующей ему резонансной частоты от температуры источника излучения с результатами численного моделирования показало, что общие потери в образце определяются потерями в сравнительно тонком поверхностном слое толщиной порядка 10 мкм (общая толщина образцов была порядка 1 мм). Это позволило сделать вывод о том, что исследуемые сплавы  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , легированные индием, характеризуются чрезвычайно малой длиной диффузии фотовозбужденных носителей, а толщина слоя, в котором происходит фотовозбуждение носителей, определяется коэффициентом поглощения ИК излучения.

Повышение температуры фазового перехода полупроводников—сегнетоэлектриков  $Pb_{1-x}Sn_xTe(In)$  с введением германия согласуется с теорией влияния на сегнетоэлектрические свойства соединений  $A^4B^6$  диполь-дипольных взаимодействий в этих кристаллах [3]. Согласно [3], неустой-

чивость  $TO$ -колебаний решетки возникает в результате большого вклада в диэлектрические свойства электронной подсистемы в отличие от традиционных сегнетоэлектриков, в которых этот вклад незначителен. Введение германия понижает степень ионности сплава, что приводит к увеличению вклада дипольных сил в  $\omega_{TO}^2$ , и устойчивость решетки падает. Исследование влияния примеси германия на диэлектрические свойства сплавов  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ , легированных индием и имеющих аномально низкую концентрацию носителей, позволило «отстроиться» от зависимостей диэлектрической проницаемости и температуры фазового перехода от концентрации носителей при большой ее величине [2]. Как известно, примесь индия в сплавах  $A^4B^6$  образует локальные уровни в электронном спектре на фоне разрешенных состояний. Можно полагать, что подобного типа локальные уровни, имеющие резонансный характер [4], атомы индия образуют на фоне колебательного спектра кристаллов  $A^4B^6$ . Этому способствует различие в массе атомов индия и элементов основной решетки. Такие локальные уровни можно характеризовать как «жесткие»: их частота и амплитуда выше, чем для колебаний оптической моды основной решетки. Согласно [5], это должно привести к стабилизации высокотемпературной кубической фазы и понижению  $T_c^B$ , что и наблюдалось в экспериментах по введению индия в сплавы  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ . Поскольку примесь индия обладает высокой растворимостью в кристаллах  $A^4B^6$ , она распределяется весьма равномерно в исходной решетке [6]. Это позволяет предполагать, что атомы индия образуют неупорядоченную сверхрешетку с собственным спектром колебаний. Атомы индия в кристаллах  $A^4B^6$  в результате спонтанной диссоциации [6, 7] могут быть в двух зарядовых состояниях  $In^{1+}$  и  $In^{3+}$ , т. е. могут играть роль отрицательных или положительных зарядовых центров на фоне двухвалентных элементов решетки. При этом, согласно [7], вначале (до 1 ат.%) индий растворяется, как  $In^{3+}$ , так что сверхрешетка индия в  $A^4B^6$  при концентрации его 0.5 ат. % положительно заряжена относительно основной решетки. Это способствует концентрации свободных электронов возле атомов примеси, захвату их на колебательные уровни подрешетки  $In$ , а при фотоинжекции с этих уровней — удержанию носителей возле положительно заряженных центров, препятствующих диффузии.

#### Список литературы

- [1] Борщевский В. В., Моденов В. П., Пырогов Ю. А. // Метрология в радиоэлектронике. VI Всес. науч.-техн. конф. М., ВНИИФТРИ, 1984. С. 94.
- [2] Nishi S., Kawamura H., Murasi H. // Phys. St. Sol. (b). 1980. V. 97. N 3. P. 581—590.
- [3] Квятковский О. Е. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 4. С. 983—990.
- [4] Марадудин А. Дефекты и колебательный спектр кристаллов. М.: Мир, 1968. 432 с.
- [5] Брус А., Каули Р. Структурные фазовые переходы. М.: Мир, 1984. 407 с.
- [6] Драбкин И. А., Квантов М. А., Компаниец В. В., Костиков Ю. П. // ФТП. 1982. Т. 16. № 7. С. 1276—1277.
- [7] Драбкин И. А., Мойжес Б. Я. // ФТП, 1981. Т. 15. № 4. С. 625—648.

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
Москва

Поступило в Редакцию  
15 мая 1989 г.