

ИЗМЕНЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ P-N ПЕРЕХОДОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ПОЛУПРОВОДНИКА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ФАЗУ

С.П. Гришечкина, А.Т. Лупу

Исследованы фотоэлектрические свойства p-n переходов в сегнетофазе. Обнаружено, что при температурах ниже температуры сегнетоэлектрического фазового перехода (T_c) происходит смена знака фотоздс, сопровождающаяся появлением узкого максимума на длинноволновом краю спектра фотопроводимости и максимума в температурном ходе емкости. Для интерпретации полученных закономерностей предложена модель p-n перехода, учитывающая экранировку спонтанной поляризации.

Среди полупроводников-сегнетоэлектриков $Pb_{1-x}Ge_xTe$ является наиболее удобным объектом для изучения как влияния спонтанной поляризации на электрические и оптические свойства однородных материалов и структур на их основе, так и изменения сегнетоэлектрических характеристик из-за экранировки поляризации свободными носителями. Этот материал может быть получен как p-, так и n-типа, а температура сегнетоэлектрического фазового перехода легко изменяется варьированием состава.

Так как $Pb_{1-x}Ge_xTe$ принадлежит к узкозонным полупроводникам с шириной запрещенной зоны $\approx 0,3$ эВ с большой концентрацией свободных носителей, обладающих высокой подвижностью, то изучение сегнетоэлектрических свойств этого материала, и особенно их полевых зависимостей, проводилось на структурах типа p-n переходов или барьеров Шоттки /1/. Исследования p-n переходов, изготовленных на основе $Pb_{1-x}Ge_xTe$, показали, что при переходе материала в сегнетоэлектрическую фазу существенно изменяются его электрические характеристики и их полевые зависимости /2/.

Исследование этих свойств проводилось в окрестности температуры сегнетоэлектрического фазового перехода (T_c), где имеется возможность сопоставления экспериментальных результатов с расчетами /3, 4/.

P-n переход в сегнетоэлектрической фазе материала и роль экранировки спонтанной поляризации теоретически не изучены. Изменение электрических /5/ и оптических /6/ характеристик p-n переходов в сегнетоэлектрической фазе может быть связано с возникновением поля деполяризации, которое в исследуемом материале уже при $T_c - T > 10$ К превышает поле p-n перехода.

На рис. 1 представлены температурные зависимости емкости S p-n перехода с $x = 0,053$, измеренные на частоте $f = 9$ кГц, и фотонапряжения, возникающего при освещении образца немодулированным фоновым излучением комнатной температуры. Температура сегнетоэлектрического фазового перехода на рис. 1 отмечена стрелкой. Из сопоставления рис. 1а и 1б следует корреляция между возникающим в сегнетофазе ($T < T_c$) максимумом емкости и изменением знака сигнала фотоответа.

Исследования температурной зависимости фотонапряжения при разных длинах волны падающего света показали, что возникновение в сегнетофазе максимума на кривой $S = F(T)$ однозначно связано с появлением максимума в спектре фотоздс вблизи края фундаментального поглощения и изменением знака фотоответа.

Типичные спектры фотоответа при разных температурах показаны на рис. 2. Видно, что при понижении температуры отрицательный сигнал сначала появляется на длинноволновом краю спектра фотоответа, а затем, по мере понижения температуры, происходит изменение знака сигнала во всем спектральном диапазоне, однако особенность на краю в виде максимума сохраняется. Ширина максимума на полувысоте в некоторых образцах была меньше kT (при $T = 77$ К), а величина значительно превышала сигнал в коротковолновой области спектра. Фаза сигнала в максимуме отличалась от фазы фотоответа при других длинах волн на величину $\approx 60^\circ$.

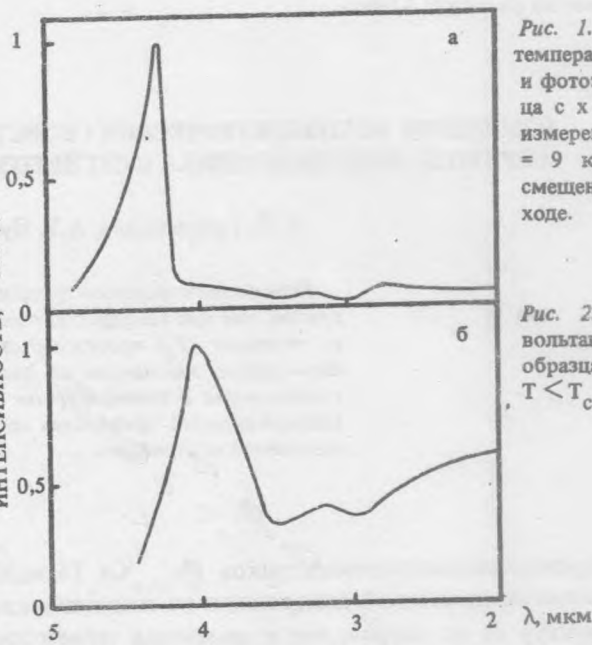
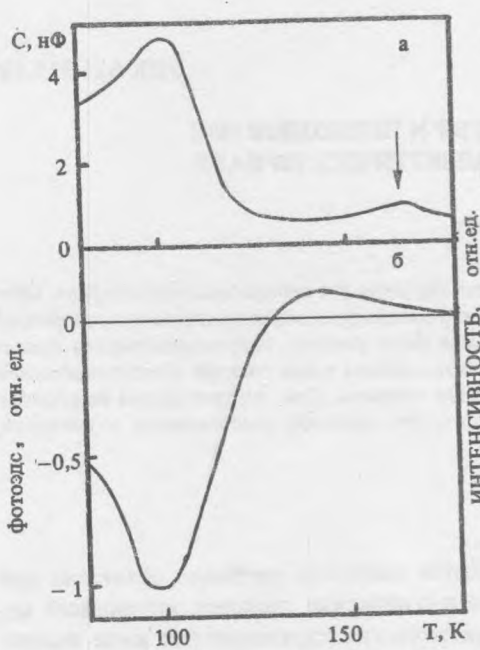


Рис. 1. Зависимость от температуры емкости (а) и фотоздс (б) для образца с $x = 0,053$. Емкость измерена на частоте $f = 9$ кГц при нулевом смещении на р-п переходе.

Рис. 2. Спектры фотovoltaического ответа образца с $x = 0,053$ при $T < T_c$ (а) и $T > T_c$ (б).

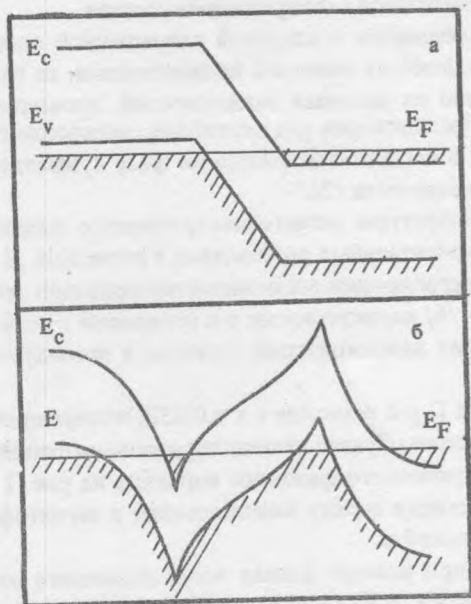


Рис. 3. Энергетическая схема р-п перехода при $T > T_c$ (а) и $T < T_c$ (б).

Длинноволновый максимум в спектре существует в ограниченной области смещений, подаваемых на р-п переход, соотношения сигналов фототовета при $\lambda = 4,2$ мкм и при прочих длинах волн резко изменялись при подаче как положительного, так и отрицательного смещения на р-п переход и проходили через максимум вблизи нулевого смещения. Эти данные были получены при $T = 77$ К на образцах с $x \approx 0,06$, когда материал находился в сегнетоэлектрической фазе.

Емкостный сигнал и сигнал фототовета вблизи максимума росли с уменьшением частоты, и хотя частотный диапазон, в котором были проведены измерения емкостных и фотосигналов, перекрывался слабо, общий ход зависимостей указывал на то, что частотные характеристики этих сигналов подобны.

Для объяснения возникающих в сегнетофазе кристалла аномалий фотоэлектрических свойств (появление максимума на кривой $C = F(T)$), изменение знака сигнала и резкое изменение спектральной зависи-

мости фотоответа) было предположено, что первопричиной возникающих аномалий является поле деполяризации, которое вызывает изменение энергетической структуры p-n перехода. На рис. 3 показано предполагаемое изменение структуры p-n перехода при уменьшении температуры от $T > T_c$ к $T < T_c$, вызванное появлением спонтанной поляризации.

Основания для выбора такой картины изменения структуры p-n перехода были следующие:

1. Чем меньше концентрация свободных носителей и чем больше электрическое поле, тем выше температура фазового перехода. Поэтому при понижении температуры сначала изменение фазы кристалла должно произойти в области p-n перехода и в области истощения возникает спонтанная поляризация.

2. В парафазе электрическое поле p-n перехода уже велико, а в сегнетофазе при $T \ll T_c$ оно растет с понижением температуры по закону $E = \alpha P_s + \beta P_s^3$, где P_s — спонтанная поляризация. Экранировка спонтанной поляризации (компенсация электрического поля) в сегнетофазе требует увеличения соответственно числа дырок вблизи n- и электронов вблизи p-областей. Это может быть достигнуто за счет искривления энергетических зон вблизи границы домена (рис. 3).

Если принять такую схему изменения структуры p-n перехода, то появление максимума на кривой $S = F(T)$ и изменение знака сигнала фотоответа легко объяснить. Изменение спектральной характеристики фотоответа также объясняется тем, что только в узкой области энергий от края запрещенной зоны до уровня Ферми сигнал фотоответа имеет знак отрицательный, в остальном спектральном диапазоне должны возникать два сигнала противоположной полярности.

Предложенная схема дает возможность качественно объяснить наблюдавшиеся на эксперименте закономерности. Для количественных сопоставлений необходима разработка теории, учитывающей возможность существования монокломоного состояния далеко в сегнетофазе. Кроме того, при понижении температуры должен произойти фазовый переход в p- и n-областях, и для экранировки возникшей спонтанной поляризации потребуется новое перераспределение свободных и связанных зарядов, то есть новая форма потенциального рельефа.

Авторы благодарят Чижевского Е. Г. за изготовление образцов для измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anteliff G. A., Bate R. T., Buss D. D. Sol. St. Commun., 13, 1003 (1973).
2. Гришечкина С. П. и др. ФТП, 12, 1132 (1978).
3. Волков Б. А., Жоховец С. В., Чокпарова Г. А. ФТП, 12, 850 (1978).
4. Сандомирский В. Б., Халилов Ш. С., Ченский Е. В. ФТП, 16, 440 (1982).
5. Гришечкина С. П., Лупу А. Т. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 8, 22 (1988).
6. Гришечкина С. П., Чеботарева Г. П., Шотов А. П. Материалы IV Республиканского коллоквиума, изд. Мицниереба, Тбилиси, 1982, с. 149.

Поступила в редакцию 4 августа 1988 г.