

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЗАПОЛНЕНИЯ ЛОВУШЕК НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ФАЗ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

*Р.Ф.Мамин*

*Казанский физико-технический институт КНЦ РАН  
420029 Казань, Россия*

Поступила в редакцию 10 августа 1993 г.

Исследовано влияние температурного изменения заселенности уровней прилипания (ловушек) на фазовые переходы. Показано, что в результате термозаполнения ловушек может возникнуть сложная последовательность фазовых переходов, а также температурная область неустойчивого, пограничного между фазами, состояния. Такое поведение наиболее вероятно при фазовых переходах несоразмерная – соразмерная фаза, происходящих вблизи точки Лифшица.

Свойства структурных фазовых переходов в полупроводниках во многом определяются взаимным влиянием электронной и решеточной подсистем. Это приводит к изменению энергетических интервалов электронного спектра при фазовом переходе и к сдвигу температуры фазового перехода при изменении заселенности ловушек [1]. При экспериментальных исследованиях эти свойства системы проявились в ряде необычных явлений: автоколебания параметра порядка [2,3], фотостимулированное возникновение несоразмерной фазы [4,5], стимулирующее действие быстрого изменения температуры на структурные перестройки [6,7]. Последнее явление связывается с динамикой заполнения ловушек при быстром изменении температуры [7]. Данная работа посвящена исследованию влияния температурного изменения заселенности уровней прилипания (ловушек) на фазовые переходы при медленном, квазистатическом, изменении температуры.

С понижением температуры происходит постепенное заполнение уровней прилипания, причем эффективный температурный интервал, где происходит заполнение ловушек, составляет 10–40 К. В этой области температур возможно появление особенностей в структурных свойствах системы. Такое поведение наиболее вероятно, если интересующая нас область температур находится вблизи температуры фазовых переходов, особенно если это происходит вблизи поликритических точек [4]. Именно такая ситуация является предметом нашего исследования.

Рассмотрим сегнетоэлектрик-полупроводник вблизи фазового перехода. Влияние электронной подсистемы на фазовый переход проявляется в сдвиге температуры фазового перехода  $T_p$  [1]:

$$T_p = T_c - \frac{am}{a}, \quad (1)$$

где  $T_c$  – температура фазового перехода в отсутствие электронной подсистемы,  $\alpha' = 2\pi/C$  ( $C$  – константа Кюри–Вейсса),  $a$  – коэффициент разложения энергии электронов в ловушках по степеням параметра порядка,  $m$  – концентрация электронов на уровнях прилипания. Кроме того, для фазовых переходов в несоразмерную фазу существует дополнительный нелинейный сдвиг температур

фазового перехода  $T_i$  и  $T_k$ , связанный с близостью к точке Лифшица, то есть перенормировкой коэффициента  $\delta$  ( $\delta_m = \delta + cm$ ) перед членом  $(\partial\eta/\partial x)^2$  [5]:

$$T_i = T_{i0} + \frac{1}{\alpha'} \left( \frac{2\delta cm + c^2 m^2}{2\sigma} - am \right), \quad (2)$$

$$T_k = T_{k0} - \frac{1}{\alpha'} \left( 2, 2 \frac{2\delta cm + c^2 m^2}{\sigma} + am \right), \quad (3)$$

где  $T_{i0}$  и  $T_{k0}$  – температуры фазовых переходов парафаза – несоизмерная фаза и несоизмерная фаза – соразмерная фаза, соответственно, в отсутствие электронной подсистемы.

Значения стационарной концентрации электронов на уровнях прилипания имеет следующий вид [3]:

$$m(T) = \frac{n_0 M}{n_0 + N_c \exp[-(u_0 + \tilde{a}\eta^2)/kT]}. \quad (4)$$

Здесь  $n_0$  – концентрация электронов проводимости,  $M$  – концентрация уровней прилипания,  $N_c$  – плотность состояний в зоне проводимости,  $u = u_0 + \tilde{a}\eta^2$  – энергетический интервал от дна зоны проводимости до уровней прилипания, зависящий от параметра порядка  $\eta$  [3]. Значение стационарной концентрации электронов на уровнях прилипания  $m(T)$  в высокотемпературной фазе и в низкотемпературной фазе различаются в связи с тем, что в низкотемпературной фазе существует скачок энергетического интервала  $u$ , равный  $\Delta$  ( $\Delta = \tilde{a}\eta^2$ ).

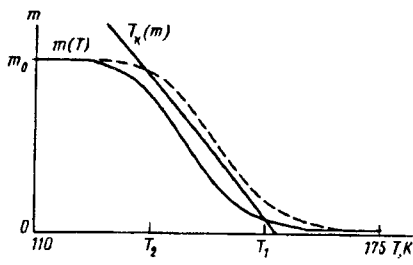


Рис 1

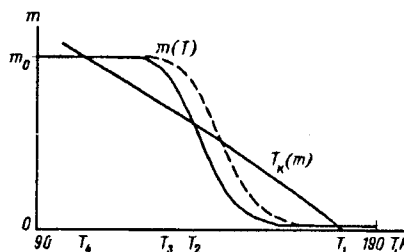


Рис 2

Рис.1. Изменение концентрации электронов  $m(T)$  с температурой и зависимости температуры фазового перехода  $T_k(m)$  от концентрации электронов на уровнях прилипания. Штриховой линией показано изменение концентрации электронов  $m(T)$  с температурой в соразмерной фазе, а сплошной линией – в несоизмерной фазе

Рис.2. То же, что на рис.1, при других значениях постоянных  $a$  и  $c$

Изменение концентрации электронов  $m(T)$  с температурой показано на рис.1,2.

Ниже, для конкретности, мы будем рассматривать случай фазового перехода первого рода несоизмерная – соразмерная фаза; температура  $T_k$  этого фазового перехода наиболее сильно отклоняется за счет электронов на уровнях прилипания (3).

Пересечение кривой  $m(T)$  (4) с кривой зависимости  $T_k(m)$  (3) температуры фазового перехода от концентрации электронов на уровнях прилипания дает температуру фазового перехода в реальном кристалле (рис.1,2). Если мы

находимся справа от кривой  $T_k(m)$ , то оказываемся в несоразмерной фазе, если слева – в соразмерной. Когда эффективное заполнение ловушек происходит вблизи температуры фазового перехода  $T_k$ , то возможны следующие случаи:

1). Случай, когда заполнение ловушек происходит либо в несоразмерной, либо в соразмерной фазе. Тогда новых фаз не возникает, и возможно только изменение в поведении низкотемпературной фазы, что мы обсудим чуть ниже (рис.3).

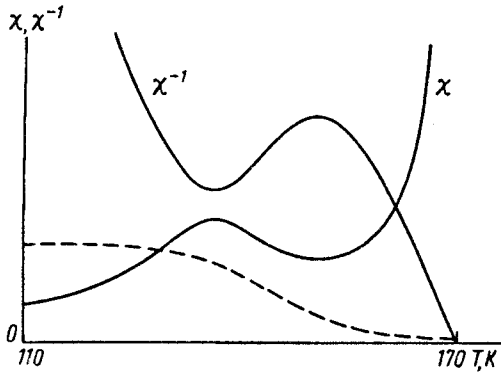


Рис.3. Изменение восприимчивости  $\chi(T)$  и  $\chi^{-1}(T)$  в температурной области заполнения ловушек  $m(T)$  (штриховая линия)

2). На рис.1 показан случай, когда заполнение ловушек происходит в непосредственной близости фазового перехода первого рода несоразмерная – соразмерная фаза. С понижением температуры после фазового перехода при температуре  $T_1$  скачком изменяется ширина энергетического интервала  $u = u_0 + \Delta$ , что приводит к уменьшению вероятности термозаброса из ловушек в зону проводимости. В результате этого происходит заполнение ловушек до уровня  $\sim M$ , в результате эффективная температура фазового перехода становится  $\sim T_2$  и система оказывается в несоразмерной фазе. Теперь стационарное значение концентрации электронов на уровнях прилипания  $m$  много меньше  $M$ ; соответственно, эффективная температура фазового перехода  $\sim T_1$ , и мы возвращаемся в несоразмерную фазу и к началу нашей динамики. В результате такой динамики концентрация электронов на уровнях прилипания, при изменении температуры от  $T_1$  до  $T_2$ , будет изменяться вдоль кривой  $T_k(m)$ , а решеточная подсистема будет находиться в промежуточном состоянии между несоразмерной и соразмерной фазами. Таким образом, в интервале температур  $T_2 \div T_1$  состояние системы будет неустойчивым и любое малое воздействие переведет систему в ту или иную фазу.

3). На рис.2 показан случай, когда заполнение ловушек происходит в низкотемпературной фазе в непосредственной близости фазового перехода. Кроме того, существует сильное влияние электронной подсистемы на фазовый переход. В результате возникает следующая последовательность фазовых переходов при понижении температуры. При температуре  $T_1$  происходит фазовый переход из несоразмерной фазы в соразмерную фазу. При температуре  $T_2$  происходит фазовый переход из несоразмерной фазы в неустойчивое состояние, свойства которого описаны в п.2. При температуре  $T_3$  происходит фазовый переход из неустойчивого состояния в несоразмерную фазу, которая существует вплоть до температуры  $T_4$ . При температуре  $T_4$  вновь возникает низкотемпературная соразмерная фаза.

В области неустойчивого состояния наиболее вероятен следующий сценарий развития событий. Как только система переходит в одно из состояний, резко изменяется характер поведения концентрации электронов на уровнях прилипания  $m$ . Если до этого концентрация электронов  $m$  увеличивалась, то теперь начинает уменьшаться, и наоборот. Система остается во вновь образовавшейся фазе, пока концентрация электронов  $m$  не изменится на величину  $\Delta m$ , соответствующую температурному гистерезису фазового перехода  $\Delta T_r$ :

$$\Delta m \approx \frac{\alpha' \Delta T_r}{a + (4,4\delta c/\sigma)}. \quad (5)$$

После этого происходит обратный фазовый переход и сценарий повторяется. Таким образом, в неустойчивом состоянии концентрация электронов  $m$  находится вблизи кривой  $T_k(m)$  в интервале  $\Delta m$ , а система переходит то в одну, то в другую фазу.

Кроме описанного выше сценария, в неустойчивом состоянии возможно расслоение системы на домены с различными фазами. Однако в рамках отдельного домена состояние системы будет также неустойчивым.

Аналогичные изменения могут возникать при любых других фазовых переходах первого и второго рода. Неустойчивое состояние может возникать только в случае фазового перехода первого рода. Кроме того, само состояние упорядоченной фазы зависит от состояния электронной подсистемы. Поэтому если эффективное заполнение ловушек будет происходить в низко-температурной фазе, возникнет нетривиальное изменение параметра порядка низко-температурной фазы. Это проявится в виде особенности в восприимчивости:

$$\chi = \left\{ 2\alpha'(T_c - T) - 2 \left( 2,2 \frac{2\delta c m + c^2 m^2}{\sigma} + a m \right) \right\}^{-1}, \quad T < T_k. \quad (6)$$

Такое поведение может выглядеть, как размытый фазовый переход второго рода (рис.3).

Таким образом, в работе показано, что процессы заполнения ловушек могут существенным образом изменить последовательность фазовых переходов в системе. Кроме того, в случае фазового перехода первого рода в некоторой области температур может возникнуть неустойчивое промежуточное состояние системы. Наиболее вероятно такое поведение в области фазового перехода несоизмерная - соизмерная фаза.

Автор благодарен Г.Б.Тейтельбауму за интерес к работе и полезное обсуждение результатов.

- 
1. В.М.Фридкин, Сегнетоэлектрики-полупроводники, М.: Наука, 1976.
  2. И.М.Шмытько, В.Ш.Шехтман, В.И.Иванов, С.С.Хасанов, Письма в ЖЭТФ 29, 425 (1979).
  3. Р.Ф.Мамин, Г.Б.Тейтельбаум, Письма в ЖЭТФ 44, 326 (1986).
  4. Ю.М.Высочанский, В.Ю.Сливка, УФН 162, 139 (1992).
  5. Р.Ф.Мамин, ФТТ 33, 2609 (1991).
  6. Н.С.Афоникова, С.С.Хасанов, И.М.Шмытько, Письма в ЖЭТФ 41, 256 (1985).
  7. Р.Ф.Мамин, Г.Б.Тейтельбаум, ФТТ 32, 2627 (1990).