

## ЭФФЕКТЫ ПАМЯТИ В НЕСОРАЗМЕРНОЙ ФАЗЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Р.Ф.Мамин

Предложен новый подход к описанию эффектов памяти в несоразмерной фазе, основанный на возникновении неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания. Установлена взаимосвязь наблюдаемых аномалий физических свойств кристаллов с характеристиками полупроводниковой подсистемы.

В теории несоразмерной фазы существует проблема описания эффектов запоминания системой своего состояния после длительного выдерживания при определенной температуре  $T_0$ . Этот эффект проявляется в аномалиях физических величин при последующем прохождении данной температуры <sup>1-5</sup>. Для описания подобных явлений предлагались различные механизмы, связанные с дефектами <sup>6,7</sup>. В данной работе сделана попытка связать эффекты памяти с кинетикой электронной подсистемы, что позволяет определить аномалии физических свойств и временные характеристики памяти из параметров полупроводниковой подсистемы.

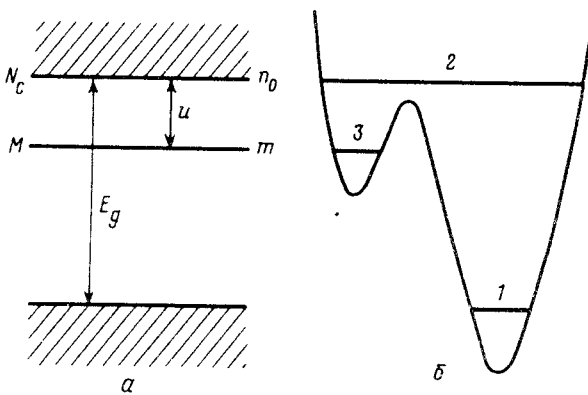


Рис. 1. а - зонная структура полупроводника; б - схема уровней дефектной системы: 1 - основное состояние, 2 - возбужденное состояние, 3 - метастабильное состояние

Известно, что состояние решеточной системы в сегнетоэлектриках-полупроводниках зависит от концентрации электронов  $m$  на уровнях прилипания <sup>8</sup> (рис.а), что следует учитывать при описании несоразмерной фазы <sup>9</sup>. Термодинамический потенциал системы, описывающий несоразмерную фазу, можно записать в следующем виде:  $\Phi = \frac{1}{L} \int \bar{\Phi} dx$ ,

$$\bar{\Phi} = \Phi_0 + \frac{\alpha + am}{2} \eta^2 + \frac{\beta}{4} \eta^4 + \frac{\delta}{2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^2 + \frac{\sigma}{4} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}\right)^2. \quad (1)$$

Здесь  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \sigma, \kappa$  - коэффициенты разложения решеточной части термодинамического потенциала по степеням параметра порядка и его производным ( $\alpha = \alpha'(T - T_c)$ ),  $\eta$  - параметр порядка,  $\eta = \rho \cos \varphi(x)$ ,  $\rho$  и  $\varphi$  - амплитуда и фаза параметра порядка, член  $am$  описывает сдвиг температуры фазового перехода за счет электронов на уровнях прилипания. При этом концентрация электронов на уровнях прилипания  $m$  зависит от состояния решеточной системы, поэтому в области несоразмерной фазы или модулированной структуры наряду с однородной

возникает неоднородная концентрация электронов на уровнях прилипания:

$$m = m_0 + m_1(x) \quad (2)$$

Здесь  $m_0$  - однородная концентрация электронов на уровнях прилипания, а  $m_1(x)$  - ее неоднородная часть. Значения неоднородной и однородной концентрации электронов на уровнях прилипания найдем из уравнения, описывающего динамику концентрации электронов на уровнях прилипания:

$$\frac{dm}{dt} = \gamma_n n_0 (M - m) - \gamma_n m N_c \exp\left(-\frac{u_0 + \tilde{a}\eta^2}{kT}\right). \quad (3)$$

Здесь  $n_0$  - концентрация электронов проводимости,  $M$  - концентрация уровней прилипания,  $\gamma_n$  - кинетический коэффициент,  $N_c$  - 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 <sup>9</sup>. Из (3) находим равновесную концентрацию электронов на уровнях прилипания:

$$m = \frac{n_0 M}{n_0 + N_c \exp\left(-\frac{u_0 + \tilde{a}\eta^2}{kT}\right)} \quad (4)$$

Таким образом в равновесных условиях за счет модуляции термозаброса возникает неоднородная концентрация электронов на уровнях прилипания. Разлагая  $m$  (4) по малому параметру  $\tilde{a}\eta^2/kT$  находим:

$$m_0 = \frac{n_0 M}{n_0 + N_c \exp\left(-\frac{u_0}{kT}\right)}; \quad m_1(x) \approx \frac{N_c \exp\left(-\frac{u_0}{kT}\right) \frac{\tilde{a}m_0}{kT}}{n_0 + N_c \exp\left(-\frac{u_0}{kT}\right)} \eta^2 \quad (5)$$

При этом времена релаксации  $\tau_m$  концентрации электронов на уровнях прилипания определяются процессами термозаброса:

$$\tau_m = (\gamma_n (n_0 + N_c \exp(-u_0/T)))^{-1} \quad (6)$$

Времена  $\tau_m$  являются достаточно медленными для описания эффектов памяти: при  $\gamma_n = 10^{-13} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$ ,  $n_0 = 10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и  $u_0/kT = 20 - 25$  (например  $u_0 = 0,12 \text{ эВ}$  при  $T \sim 50 \text{ К}$  у прустита <sup>9</sup>) имеем  $\tau_m = 5 \div 300 \text{ мин}$ . При этом среднее значение  $m_1(x)$  в образце порядка  $0,15 m_0$ .

Таким образом с понижением температуры происходит фазовый переход в несоразмерную фазу и в дальнейшем, наряду с изменением  $k(T)$ , возрастает амплитуда параметра порядка. При этом однородная часть концентрации электронов на уровнях прилипания подстраивается к равновесному значению  $m_0$  (5). После остановки при определенной температуре  $T_0$  постепенно нарастает неоднородная часть концентрации электронов на уровнях прилипания, что приводит к постепенному уменьшению амплитуды параметра порядка от значения  $\rho^2 \approx -(\alpha + am_0)/\beta$  к равновесному значению

$$\rho_0^2 = -\frac{\alpha + am_0}{\beta + \frac{a\tilde{a}m_0}{kT}} \quad (7)$$

В соответствии с этим изменяются и другие физические свойства, зависящие от параметра порядка. Теперь система запомнит неоднородное распределение концентрации электронов в ловушках с определенным значением волнового вектора  $k(T_0)$  если даже изменить температуру. Время релаксации такого метастабильного состояния  $5 \div 300$  минут. Если через некоторое время, меньшее  $\tau_m$ , вновь пройти через эту температуру, то в температурной зависимости амплитуды параметра порядка появится прогиб соответствующий совпадению волнового

вектора возникшей структуры и волнового вектора неоднородного распределения концентрации электронов в ловушках. Если остановиться при этой температуре, то система за короткое время  $\tau_n$  подстроится к неоднородному распределению электронов в ловушках - таким образом система вспоминает свое состояние. Далее с временами  $\tau_m$  происходит дальнейшая релаксация к  $\rho_0$  (б) если это значение еще не достигнуто. Аналогичные явления наблюдались в работах <sup>1-5</sup>.

Возникающая структура неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания может заставить несоразмерную фазу вести себя подобно соразмерной фазе, так как поведение концентрации электронов будет коррелировать с поведением основной решетки.

Данный подход может быть использован для описания влияния собственных дефектов в метастабильных состояниях на фазовый переход (рис. б), с той лишь разницей, что переменная  $m$  соответствует концентрации дефектов в метастабильном состоянии.

Из проведенного анализа следует, что эффекты памяти в несоразмерной фазе в полупроводнике связаны с возникновением неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания, поэтому освещение и другие воздействия, приводящие к изменению заселенности уровней прилипания, будут существенно влиять на эффекты памяти.

Автор благодарен Тейтельбауму Г.Б. за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения.

## Литература

1. Uhrig H. G. J. Phys. C: Sol. Stat. Phys., 1983, 16, 3245.
2. Uhrig H.-C. Ferroelectrics, 1984, 53, 319.
3. Folcia C.L., Tello M.J., Perez-Mato J.M. Sol. Stat. Comm., 1986, 60, 581.
4. Folcia C.L., Tello M.J., Perez-Mato J.M. Phys. Rev. B, 1987, 36, 7181.
5. Влох О.Г., Каминский Б.Б., Китык А.В. и др. ФТТ, 1985, 27, 3436.
6. Jamet S.P., Lederer P. J. Phys. Lett., 1983, 44, L257.
7. Вихнин В.С. Изв. АН СССР, сер. физ., 50, 340.
8. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники. М.: Наука, 1976.
9. Мамин Р.Ф., Тейтельбаум Г.Б. ФТТ, 1988, 30, 3536.