

ГЛОБАЛЬНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ГИСТЕРЕЗИС В НЕСОРАЗМЕРНОЙ ФАЗЕ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Р.Ф.Мамин

*Казанский физико-технический институт АН СССР
420029, Казань*

Поступила в редакцию 7 февраля 1991 г.

После переработки 16 апреля 1991 г.

Предложен новый подход к описанию гистерезисных явлений в несоразмерной фазе, основанный на учете динамики неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания в полупроводнике. Установлена взаимосвязь наблюдаемых аномалий физических свойств кристаллов с характеристиками полупроводниковой подсистемы.

В последние годы большое внимание уделяется исследованиям несоразмерной фазы. В области несоразмерной фазы наблюдается температурный гистерезис физических свойств: при одной и той же температуре при нагревании

и охлаждении наблюдаются различные значения физических величин ¹⁻⁶. Область температур в которой наблюдается это различие сравнима с областью существования несоизмерной фазы, и эти явления существенно зависят от динамики изменения температуры, поэтому это явление характеризуется как глобальный динамический гистерезис ^{2,5}. В ряде работ ^{1,7} его связывают с закреплением доменных границ на дефектах или с перераспределением подвижных дефектов. При этом остается не решенной проблема оценки параметров дефектов и степени их влияния. В данной работе предлагается связать гистерезисные явления в несоизмерной фазе с динамикой электронной подсистемы в полупроводнике. Это является особо актуальным, так как появились эксперименты в которых наблюдают влияние освещения на эффекты памяти в $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{Se}_6$ ⁸, поэтому, из-за связи механизмов гистерезиса и эффектов памяти ¹, следует рассматривать электронный механизм гистерезисных явлений в системах подобных $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ и Ag_3AsS_3 .

В данной работе мы обсудим системы с произвольной шириной запрещенной зоны E_g , имеющие некоторую концентрацию электронов проводимости n_0 ($n_0 \approx 10^8 \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$), которая является феноменологическим параметром. В запрещенной зоне существуют уровни прилипания, отделенные от дна зоны проводимости энергетическим интервалом u и находящиеся в температурном обмене электронами с зоной проводимости. Концентрация уровней прилипания M ($M \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$), а концентрация электронов на них m . Изменение концентрации m существенно влияет на параметры системы вблизи фазового перехода. Например, диэлектрическая восприимчивость $\chi = (\partial^2 G / \partial \eta^2)^{-1}$ зависит от концентрации электронов на уровнях прилипания m ⁹:

$$\chi = \frac{1}{\alpha'(T_i - T) - am} \approx \chi_0 + \delta m \quad (1)$$

χ_0 - диэлектрическая восприимчивость в равновесных условиях, $\delta m = m - m_p$ - отклонение концентрации электронов на уровнях прилипания от равновесного состояния, a - определяется электрон-фононным взаимодействием и величину его можно найти из изменения ширины запрещенной зоны: $E_g = E_{g0} + a\eta^2$ ($a = 10^{-23} - 10^{-18} \text{ см}^3$). Времена релаксации концентрации электронов на уровнях прилипания к равновесному значению являются достаточно большими (5 - 300 мин), при этом сами равновесные значения меняются с изменением температуры. Кроме того, энергетические барьеры, а значит и времена релаксации электронов, зависят от параметра порядка, поэтому в области несоизмерной фазы в равновесии должна возникать пространственно неоднородная концентрация электронов на уровнях прилипания. При этом температурное поведение периода параметра порядка отличается от температурного поведения размера элементарной ячейки. Поэтому неоднородная часть равновесной концентрации электронов на уровнях прилипания, связанная с параметром порядка, будет вести себя независимо от основной решетки, и в выделенной ячейке кристалла равновесная неоднородная концентрация при изменении температуры будет то возрастать, то уменьшаться.

Уравнение, описывающее динамику электронов на уровнях прилипания, имеет следующий вид:

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

Здесь γ_n - кинетический коэффициент, N_c - плотность состояний в зоне проводимости, $u = u_0 + \tilde{a}\eta^2(x)$ - энергетический интервал от дна зоны проводи-

мости до уровней прилипания, зависящий от параметра порядка $\eta(x)$, соответствующего минимуму термодинамического потенциала, коэффициенты которого в свою очередь зависят от концентрации электронов на уровнях прилипания ¹⁰. В области несоразмерной фазы параметр порядка $\eta(x)$ является периодической функцией координаты x (в простейшем случае гармонической зависимости $\eta = \rho \cos(kx)$). При этом времена релаксации τ_m концентрации электронов на уровнях прилипания определяются процессами термозаброса:

$$\tau_m = (\gamma_n(n_0 + N_c \exp(-u_0/T)))^{-1}. \quad (3)$$

Времена τ_m являются достаточно медленными для описания гистерезиса при $\gamma_n = 10^{-13} \text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $n_0 = 10^8 - 10^{10} \text{см}^{-3}$, $N_c = 10^{19} \text{см}^{-3}$ и $u_0/kT = 20 \div 25$ [$u_0 = 0,12$ эВ при $T \sim 50 \text{К}$ в Ag_3AsS_3 ⁹; $u_0 = 0,7$ эВ при $T \sim 300 \text{К}$ в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$] имеем $\tau_m = 5 \div 300$ мин. Из (2) находим равновесную концентрацию электронов на уровнях прилипания:

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

Разлагая $m_p(4)$ по малому параметру $\tilde{a}\eta^2/kT$ находим значения однородной m_0 и неоднородной $m_1(x)$ концентраций электронов в ловушках:

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

При этом среднее значение $m_1(x)$ в образце порядка $0,15m_0$ и более.

С понижением температуры происходит постепенное заполнение уровней прилипания. Так как времена релаксации достаточно велики, уже равновесная концентрация электронов m_0 достигается только при достаточно медленном охлаждении. Неоднородная концентрация электронов на уровнях прилипания $m_1(x)$ при существующих скоростях охлаждения ($0,1 \div 0,001$ К/мин) практически не возникает. Это связано с тем, что температурное поведение несоразмерной волны не коррелирует с температурным поведением основной решетки. В результате, в любой выделенной точке решетки, в которой может локализоваться электрон в состоянии уровня прилипания, значение параметра порядка постоянно меняется. Также постоянно меняются добавки к энергетическому барьеру, связанный с параметром порядка. Ввиду больших времен релаксации, электронная система не успевает почувствовать неоднородность энергетического барьера, и неоднородного электронного состояния не возникает. В соответствии с этим изменяется и параметр порядка.

Когда мы повышаем температуру, то происходит процесс постепенного опустошения ловушек. Но, так как этот процесс опять запаздывает по сравнению с изменением температуры, то ловушки оказываются эффективно переполненными. К тому же в соразмерной фазе существует часть концентрации, связанная с однородным параметром порядка для релаксации которой также необходимо время.

Существенным является то, что вследствие движения несоразмерной волны относительно решетки при изменении температуры не происходит образования неоднородной концентрации электронов в ловушках.

На рисунке представлено пространственное распределение концентрации электронов на уровнях прилипания при одной и той же температуре после нагревания 1 и охлаждения 2, полученное в результате численных расчетов согласно уравнения (2) (случай прустита Ag_3AsS_3 ^{5,7}). Штриховой линией показано равновесное распределение электронов на уровнях прилипания.

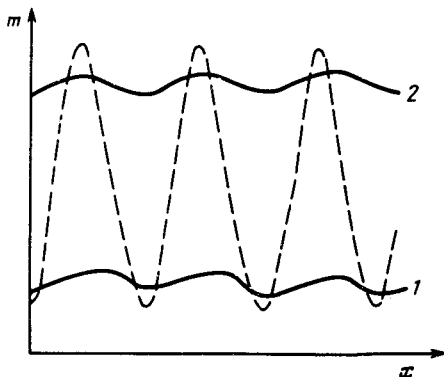


Рис. 1. Результаты численных расчетов (случай прустита Ag_3AsS_3 ^{5,7} согласно уравнения (2) пространственного распределения концентрации электронов m на уровнях прилипания при одной и той же температуре после нагревания 1 и охлаждения 2, штриховой линией показано равновесное распределение электронов на уровнях прилипания

В несоизмерной фазе наблюдаются и частные петли гистерезиса, т.е. когда температура изменяется между двумя значениями T_1 и T_2 ($T_1 < T_2$) внутри несоизмерной фазы также наблюдается гистерезис физических свойств. При этом происходят следующие процессы. При охлаждении до T_0 происходит заполнение уровней прилипания до уровня m_0 , т.е. с запаздыванием на неоднородную концентрацию m_1 . При начале нагревания сначала концентрация электронов будет стремиться достичь своего равновесного значения, продолжая увеличиваться, далее происходит постепенное уменьшение концентрации. В начале этого процесса прежде всего неоднородная концентрация уменьшается до уровня однородной, определяемой однородным параметром порядка. Далее изменение общей концентрации будет происходить по кривой охлаждения. При переходе к охлаждению прежде всего исчезнет концентрация, связанная с параметром порядка, а далее процесс будет происходить по кривой охлаждения. Таким образом, образуется параллелепипед частного температурного гистерезиса.

В данном подходе объясняется увеличение разницы значений наблюдаемых величин с уменьшением температуры. Во-первых, ожидаемый эффект пропорционален квадрату параметра порядка, амплитуда которого увеличивается с понижением температуры, во-вторых, с уменьшением температуры уменьшается вероятность термозаброса, соответственно увеличиваются времена релаксации концентрации электронов к равновесному значению, что также ведет к увеличению эффекта. Зависимость от скорости изменения температуры и от начальной температуры очевидна: при меньших скоростях большее количество электронов успевает срелаксировать к равновесному состоянию, а от начальной температуры зависит начальная концентрация электронов на уровнях прилипания.

В рамках данного подхода находит объяснение "обратный" ход гистерезиса в Ag_3AsS_3 (прустит). Это явление связано с запоминанием однородной части концентрации электронов на уровнях прилипания (подробно см. ¹¹). Данное явление присуще всем фазовым переходам в полупроводниках.

Величину эффекта также определяет тот факт, что, по нашим оценкам, в известных нам полупроводниковых кристаллах Ag_3AsS_3 (прустит) и $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ в области температур, в которой существует несоизмерная фаза, происходит процесс эффективного заполнения уровней прилипания. Это также усиливает эффект. В связи с этим возникает предположение, что процесс заполнения уровней прилипания может играть важную роль в процессе образования несоизмерной фазы как таковой. При заполнении уровней прилипания происходит локализация электронов, что изменяет баланс сил внутри кристалла, что может привести к образованию несоизмерной фазы.

Автор благодарен Тейтельбауму Г.Б. за полезное обсуждение.

Литература

1. Jamet J.P., Lederer P. J. *Physique Lett.*, 1983, **44**, L257.
 2. Струков Б.А., Уесу И., Арутюнова В.М. Письма в ЖЭТФ, **35**, 424.
 3. Струков Б.А., Арутюнова В.М., Уесу И. ФТТ, 1982, **24**, 3061.
 4. Влох О.Г., Каминский Б.В., Половинко И.И., Свелеба С.А. ФТТ, 1986, **28**, 2193.
 5. Шмыгько И.М., Шехтман В.Ш., Багаутдинов Б.Ш., Афоникова Н.С. ФТТ, 1990, **32**, 2441.
 6. Влох О.Г., Каминский Б.В., Кигьк А.В., Половинко И.И., Свелеба С.А. ФТТ, 1987, **29**, 2215.
 7. Вихнин В.С. Изв. АН СССР, сер. физ., 1986, **50**, 340.
 8. Вьсочанский Ю.М. Частное сообщение.
 9. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники. М.: Наука, 1976,
 10. Мамин Р.Ф., Тейтельбаум Г.Б. ФТТ, 1988, **30**, 3536.
 11. Мамин Р.Ф., Тейтельбаум Г.Б. ФТТ, 1990, **32**, 2627.
-