

Проводимость, стимулированная осцилляциями температуры в распавшихся твердых растворах сульфида и теллурида кадмия

© А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин

Санкт-Петербургский технологический институт,
198013 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 7 октября 1996 г. Принята к печати 28 января 1997 г.)

Исследованы релаксационные свойства пленок распавшихся твердых растворов сульфида и теллурида кадмия. Обнаружена проводимость, стимулируемая осцилляциями температуры. Изучены релаксации, вызванные изменением внешнего электрического поля и температуры. Установлено, что для исследованных образцов характерны возрастающие релаксации тока и остаточная проводимость. Результаты интерпретируются на основе модели неоднородного полупроводника.

В [1] сообщалось о релаксационных процессах в слоях CdS_xTe_{1-x} , имеющих место при низких температурах. Данная работа посвящена исследованию особенностей процессов при более высоких температурах — выше 300 К. Исследовались долговременные реакционные процессы, инициированные изменением температуры, освещенности и внешнего напряжения в слоях CdS_xTe_{1-x} , подвергнутых термоактивированному распаду.

Резкое увеличение напряжения вызывало быстрое возрастание тока до некоторого максимума, затем монотонное убывание до минимума, и вновь возрастание вплоть до стационарного значения. Характерное время возрастания тока (при 400 К порядка минуты) было во много раз больше времени убывания и экспоненциально зависело от температуры. Загорачивание образца после установления стационарного значения тока вызывало монотонное уменьшение последнего. Время релаксации "остаточной проводимости" зависело от температуры. Его можно было значительно уменьшить светом с энергией фотонов $\hbar\omega > 1.1$ эВ. При облучении ток релаксации резко возрастал.

На рис. 1 приведены результаты исследования релаксационных свойств, обусловленных изменениями температуры. Кривые 1, 2, полученные при нагреве с постоянной скоростью, содержат участки резкого возрастания проводимости. Увеличение скорости сдвигало начало резкого роста в область более высоких температур,

Было выявлено такое нетривиальное явление, как проводимость, стимулированная осцилляциями температуры (ПСОТ), т.е. осцилляции температуры вызывали существенное возрастание проводимости образцов. Величина дополнительной проводимости (амплитуда ПСОТ) зависела от температуры (кривые 3, 4). Выдержка образца при постоянной температуре даже в течение значительно большего времени практически не изменяла его проводимости. Рассмотренный эффект носил обратимый характер.

Установление электронного равновесия в неоднородном полупроводнике связано с необходимостью преодоления потенциальных барьеров. Отсюда — большое время установления равновесия и экспоненциальная его

зависимость от температуры [2–4]. При непрерывном нагреве системы, находившейся ранее в равновесии, ее проводимость примет вновь равновесное значение лишь тогда, когда характерное время нагрева t_+ сравняется с характерным временем установления равновесия между примесными уровнями и зоной проводимости τ [4]. При более низких температурах влияние примесей как бы "выключается". По достижению равенства t_+ и τ примеси "включаются" и происходит резкое возрастание сквозного тока через систему. Увеличение скорости нагрева уменьшает t_+ и поэтому для включения примесей требуется более высокая температура. Отсюда сдвиг области резкого возрастания тока.

Исходя из $t_+ = \tau$ и используя [4]

$$\tau = \tau_0 \exp(E_r/kT),$$

$$t_+ = \Delta\rho / |(d\rho_0/dT)(dT/dt)|, \quad (1)$$

можно получить приближенное равенство

$$E_r \approx \frac{kT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \left\{ \frac{(dT/dt)_2 T_1^2}{(dT/dt)_1 T_2^2} \right\} \quad (2)$$

($\Delta\rho$ — чувствительность аппаратуры, ρ_0 — измеряемая аппаратурой величина).

Для определения E_r достаточно знать температуры включения примесей T_i для разных скоростей нагрева $(dT/dt)_i$. Из (2) для образца, соответствующего рис. 1, получено $E_r \approx 0.4$ эВ. Согласно [3], эта величина определяет энергию, необходимую для перехода электронов из высокоомных областей (ВО) неоднородной системы в низкоомные области (НО). В случае исследованных образцов, очевидно, ВО — включения распавшегося твердого раствора с большой шириной квазизапрещенной зоны, а НО — включения с малой шириной. На границах этих областей несомненно имеют место поверхностные состояния (ПС) с энергией ε_s , вносящие вклад в формирование потенциального рельефа зон. Следовательно, энергетическую диаграмму системы можно представить так, как показано на рис. 2. Внешнее поле, приложенное к такой неоднородной системе искажает потенциальный рельеф [1,5]. В НО

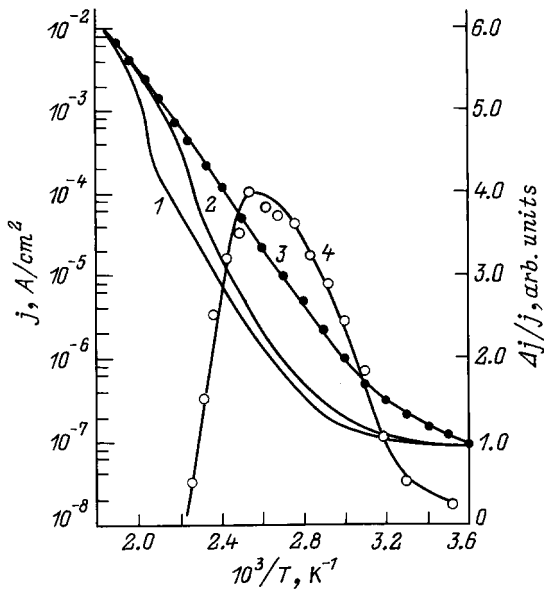


Рис. 1. Температурные зависимости плотности тока (j) при монотонном нагреве образца с постоянной скоростью $dT/dt = 0.2$ (1), 0.07 K/c (2), при осцилляциях температуры (3), а также амплитуды проводимости ($\Delta j/j$), стимулированной осцилляциями температуры (4).

внешнее поле быстро экранируется, а в ВО — наоборот, усиливается. В результате нарушается равновесие между электронами зоны проводимости и примесными уровнями объема ϵ_i и поверхностными состояниями ϵ_s . Вблизи границ НО, ориентированных к положительному полюсу, концентрация свободных носителей возрастает и создаются условия для их захвата на ϵ_s , что способствует возрастанию межкристаллитных барьеров и, следовательно, уменьшению сквозного тока. С другой стороны НО концентрация электронов уменьшается. Возникают условия для ионизации ϵ_s . Этот процесс будет приводить к понижению межкристаллитных барьеров и возрастанию проводимости. Если энергия ионизации ϵ_s будет больше амплитуды потенциального рельефа зоны проводимости, то скорость второго процесса будет меньше. Тогда установление равновесия после резкого включения внешнего напряжения будет характеризоваться током, вначале убывающим, а затем — возрастающим, что соответствует нашему эксперименту. Сказанное позволяет рассматривать энергию, вычисленную из угла наклона температурной зависимости характерного времени возрастания релаксационного тока, как энергию ионизации $\epsilon_s \sim 0.95$ эВ. Результат согласуется с [6].

Модель подтверждают исследования релаксаций "остаточной проводимости". Снятие внешнего поля вновь изменяет потенциальный рельеф, вновь нарушается равновесие между зоной и уровнями. Локализованные заряды, образовывавшие под влиянием внешнего поля экранирующие квазидиполи, сформируют разность потенциалов на электродах. Отсюда ток релаксации с

характерным временем, определяемым опустошением ловушек.

Дополняет справедливость модели выявленное ускорение релаксации остаточной проводимости светом с $\hbar\omega > 1.1$ эВ. т.е. при энергиях, близких к экспериментальному $E_r \approx 0.95$ эВ (ионизация уровня ПС ϵ_s).

Рассмотрим процессы при осцилляциях температуры. Изменение температуры нарушает равновесие между НО и ВО. Восстановление равновесия требует аномально большого времени. Экстраполяция экспериментальной температурной зависимости характерного времени возрастающих релаксаций показывает, что для исследованных образцов при $T = 300$ К характерное время τ будет равно десяткам часов. Большое значение τ объясняет причину кажущейся стабильности тока при относительно низких температурах. Однако большое время требуется неравновесным носителям для перехода из ВО в НО активационным путем, но возможен и другой путь, более быстрый — за счет перескоков по примесным уровням. Прыжковый механизм релаксаций тем более вероятен, что для слоев $A^{II}B^{VI}$, синтезированных конденсацией в вакууме, свойственна высокая плотность состояний в квазизапрещенной зоне [7].

В силу значительной величины потенциального рельефа системы перескоки электронов должны осуществляться как многофононные процессы. Необходимым условием таких перескоков являются тепловые флуктуации, выравнивающие глубины ям, между которыми совершается перескок [8]. Осцилляции температуры способствуют флуктуациям. Очевидно, это и приводит к ускорению релаксаций, которое проявляется в виде ПСОТ.

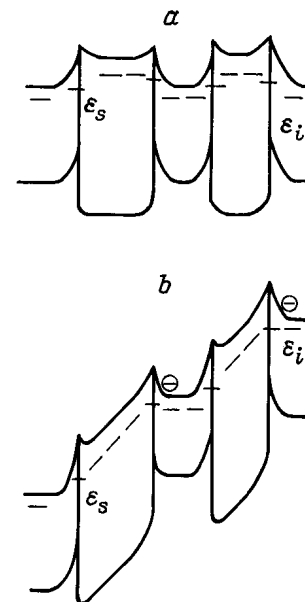


Рис. 2. Схематическое изображение зонной диаграммы распавшегося твердого раствора сульфида и теллурида кадмия без воздействия (a) и при воздействии (b) внешнего электрического поля.

Туннельный механизм ПСОТ согласуется с экспериментальной температурной зависимостью амплитуды ПСОТ (рис. 1, кривая 4). Действительно, регистрируемую экспериментально проводимость можно условно разделить на две составляющие: 1) проводимость после установления квазиравновесия в зоне (устанавливается быстро); 2) дополнительная проводимость, возникающая после установления равновесия между зоной проводимости и уровнями (устанавливается медленно). В силу нелинейной зависимости положения уровня Ферми от температуры вклад дополнительной проводимости с температурой возрастает. Следовательно, должна возрастать и амплитуда ПСОТ. Однако наряду с увеличением вклада дополнительной проводимости происходит экспоненциальное уменьшение времени, необходимого для ее установления. Значит, проводимость, регистрируемая экспериментально, уже при первой осцилляции будет содержать возрастающую с температурой часть дополнительной проводимости. Соответственно, это способствует уменьшению амплитуды ПСОТ. Конкуренция процессов и формирует максимум на температурной кривой амплитуды ПСОТ.

В заключение — два замечания. Первое касается процессов возрастания тока релаксации. Предложенная модель близка к модели, полученной в результате численного анализа переходных токов в полупроводнике с барьерными контактами [9]. Отличие имеется лишь в механизме понижения барьеров. В [9] предполагается только полевое воздействие на барьеры, усиленное перераспределением зарядов, ПС не учитываются. В рассмотренной модели за полевым воздействием следует изменение барьеров за счет изменения заряда на ПС. Нам представляется, то механизм [9] в исследованных системах мог присутствовать на каждой обратно смещенной гетерогранице, но поскольку в поликристаллах, несомненно, присутствуют ПС, то полевое воздействие на барьеры, как правило, должно вызывать описанный выше механизм.

Второе замечание касается экспериментального наблюдения ПСОТ. Для экспериментального наблюдения, как показано выше, необходимы образцы не только со своеобразным потенциальным рельефом, но и с высокой плотностью состояний в квазизапрещенной зоне. Очевидно, это является причиной редкого наблюдения описанного явления.

Работа выполнена при поддержке Всероссийского фонда фундаментальных исследований (№ 96-02-19138).

Список литературы

- [1] А.П. Беляев, В.П. Рубец, И.П. Калинин. ФТП, **31**, 222 (1997).
- [2] А.Я. Шик. ЖЭТФ, **71**, 1159 (1976).
- [3] А.Я. Шик, А.Я. Вуль. ФТП, **8**, 1675 (1974).
- [4] А.Я. Вуль, Ш.И. Набиев, А.Я. Шик. ФТП, **11**, 506 (1977).
- [5] Б.И. Шкловский. ФТП, **13**, 93 (1979).

- [6] В.А. Сментына. Автореф. докт. дис. (Киев, ИПАН УССР, 1988).
- [7] А.П. Belyaev, V.P. Rubets, I.P. Kalinkin. Thin Sol. Films, **158**, 25 (1988).
- [8] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [9] Б.А. Бобылев, Э.Г. Косцов. ФТП, **23**, 224 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

The conductivity stimulated by temperature oscillations in decomposed solid solutions of cadmium sulfide and telluride

A.P. Belyaev, V.P. Rubets, I.P. Kalinkin

St.Petersburg Institute of Technology,
198013 St.Petersburg, Russia

Abstract Relaxation properties of the films of decomposed cadmium sulfide and telluride solid solutions are studied. The conductivity stimulated by temperature oscillations is detected. The relaxations induced by variations in external electric field and temperature are studied. It is established that for the studied samples are typical increase of the relaxation current and residual conductivity. The results are considered in the framework of the inhomogeneous semiconductor model.