

# Исследование диэлектрических процессов в аморфных пленках $(As_2Se_3)_{1-x}Bi_x$

© Р.А. Кастро<sup>¶</sup>, Г.И. Грабко

Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
191186 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 2 ноября 2010 г. Принята к печати 19 ноября 2010 г.)

Проведен сравнительный анализ процесса диэлектрической поляризации, происходящего в беспримесных и легированных висмутом слоях модифицированного триселенида мышьяка. Установлено, что как сходство, так и различие поляризационных явлений обусловлено особенностями внутренней структуры исследуемых материалов. Обсуждаются механизмы наблюдаемых эффектов.

В работе [1] приводятся результаты сравнения дисперсии диэлектрических характеристик для беспримесных и легированных висмутом модифицированных слоев  $As_2Se_3$ , позволившие сделать вывод о наличии нескольких групп релаксаторов, ответственных за поляризационные процессы, а также проанализировать изменения внутренней структуры исследуемых составов, обусловленных введением примеси. Однако измерения частотных зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'(f)$ ,  $\text{tg } \delta(f)$  производились только при одной температуре,  $T = 293$  К, и одной напряженности прикладываемого к образцам электрического поля,  $E = 10^3$  В/см. Вследствие этого сложно сделать какие-либо выводы о влиянии внешних факторов на диэлектрические процессы изучаемых материалов.

В [2] аналогичные измерения производились в широком интервале температур,  $T = 233–343$  К, но при этом использовались только легированные образцы  $As_2Se_3(Bi)_x$  ( $x = 10$  ат%). Данное обстоятельство затрудняет возможность определения воздействия легирующей добавки на диэлектрические свойства модифицированного триселенида мышьяка  $As_2Se_3$ . Хотя исследование влияния примесей на различные физические свойства неупорядоченных полупроводников являются актуальными, как с точки зрения практического использования этих материалов, так и с точки зрения определения их внутренней структуры и, в частности, спектра локальных состояний. Поэтому представлялось интересным дополнить имеющийся экспериментальный материал изучением воздействия различных внешних факторов (варьирования частоты прикладываемого электрического поля, изменения температуры), а также введения примесей на процесс диэлектрической поляризации в модифицированных слоях триселенида мышьяка.

Таким образом, цель данной работы заключалась в исследовании температурно-частотных зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости чистых и легированных  $Bi$  аморфных пленок  $As_2Se_3$ .

Экспериментальные сэндвич-структуры  $Al-(As_2Se_3)_{1-x}Bi_x-Al$ , где  $x = 0–0.1$ , изготавливались методом высокочастотного напыления [1]. Толщина

пленок  $(As_2Se_3)_{1-x}Bi_x$  была  $\sim 1$  мкм, площадь перекрытия электродов  $\sim 14$  мм<sup>2</sup>. Измерение зависимостей  $\epsilon'(f, T)$ ,  $\text{tg } \delta(f, T)$  производилось по методике, описанной в [1,2]. Частота прикладываемого к образцам электрического поля варьировалась в пределах:  $f = 5 \cdot 10^{-3}–10^5$  Гц, температура  $T = 233–343$  К, а напряжение, подаваемое на них, составляло 0.1 В.

Сравнительный анализ диэлектрических параметров чистых и легированных висмутом образцов обнаруживает, что наряду со сходством поляризационных процессов данных составов у них имеются и определенные различия. И в том, и в другом случае с ростом температуры в инфранизкочастотном (ИНЧ) диапазоне,  $f < 10$  Гц, наблюдается увеличение более чем на порядок вещественной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости (рис. 1) и появление максимумов диэлектрических потерь на кривых  $\text{tg } \delta(T)$ . Причем чем больше  $f$ , тем при больших  $T$  проявляются эти эффекты. Аналогичные результаты были получены в [2].

Однако при одной и той же частоте значительные изменения  $\epsilon'$  и  $\text{tg } \delta$  для  $As_2Se_3$  начинаются при более высоких температурах (см. рис. 1 и таблицу). В отличие от  $As_2Se_3(Bi)$  для беспримесных образцов на кривых  $\epsilon'(T)$  не наблюдаются области насыщения (по крайней мере в исследованном интервале температур). Из табличных данных следует, что если для легированных слоев величины максимумов  $\text{tg } \delta_{\text{max}}$  возрастают с увеличением частоты электрического поля, то для исходных составов характерна противоположная ситуация. Помимо этого, нивелирование „аномальных“ особенностей температурных зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости у  $As_2Se_3$  начинается при меньших  $f$ . Так, в частности, последний максимум на кривой  $\text{tg } \delta(T)$  для этих слоев отмечается при частоте  $\sim 4 \cdot 10^{-1}$  Гц, а для примесных пленок  $\sim 3–4$  Гц.

Отличие в наблюдаемых особенностях диэлектрических параметров можно объяснить на основе результатов [3]. В этой работе было установлено, что при приложении постоянного электрического поля к структурам  $Al-As_2Se_3(Bi)_x-Al$  в прианодных слоях происходит накопление значительного заряда. Приконтактная область с повышенной концентрацией носителей заря-

<sup>¶</sup> E-mail: recastro@fromru.com

Экстремумы температурных зависимостей диэлектрических потерь для беспримесных и легированных висмутом образцов в инфранизком частотном диапазоне

$As_2Se_3$			$As_2Se_3(Bi)$ [2]		
$f, Hz$	$T_{max}, K$	$tg \delta_{max}$	$f, Hz$	$T_{max}, K$	$tg \delta_{max}$
$10^{-2}$	293	0.875	$5 \cdot 10^{-3}$	257	0.676
$2.35 \cdot 10^{-2}$	301	0.835	$10^{-2}$	262	0.712
$5.5 \cdot 10^{-2}$	307	0.815	$2.5 \cdot 10^{-2}$	266	0.722
$8 \cdot 10^{-2}$	311	0.812	$1.5 \cdot 10^{-1}$	278	0.763
$1.5 \cdot 10^{-1}$	315	0.811	1	299	0.8
$3.5 \cdot 10^{-1}$	323	0.809	3	311	0.937

да (НЗ) имеет определенную ширину  $d_k$ , емкость  $C_k$  и характеризуется плотностью локализованных состояний  $N_t$ . Изменение концентрации легирующей добавки от  $x = 0$  до 10 ат% Bi сопровождается уменьшением  $d_k$  и увеличением  $C_k$  на порядок и возрастанием  $N_t$  почти на 2 порядка [3]. Помимо этого, увеличивается на порядок и подвижность НЗ, переносимых через запрещенную зону, при достижении  $x = 10$  ат% Bi. В [3] значительные изменения характеристик (описывающих электронные процессы, которые происходят в приконтактных областях) при росте  $x$  связывались с существенным преобразованием внутренней структуры исследуемых соединений и появлением упорядоченных включений с повышенным содержанием примеси вследствие введения легирующей добавки [4].

Совокупность перечисленных факторов обеспечивает большую „чувствительность“ легированных образцов к внешним факторам воздействия. Как говорилось выше, это реализуется в том, что значительная трансформация кривых  $\epsilon'(T)$ ,  $tg \delta(T)$  при одной и той же  $f$  у  $As_2Se_3(Bi)$  начинается при меньших температурах, величина  $tg \delta_{max}$  для данных образцов с увеличением частоты возрастает (в противоположность уменьшению этого параметра у исходных составов), а нивелирование „аномалий“ температурных зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости для легированных пленок начинается при больших  $f$ .

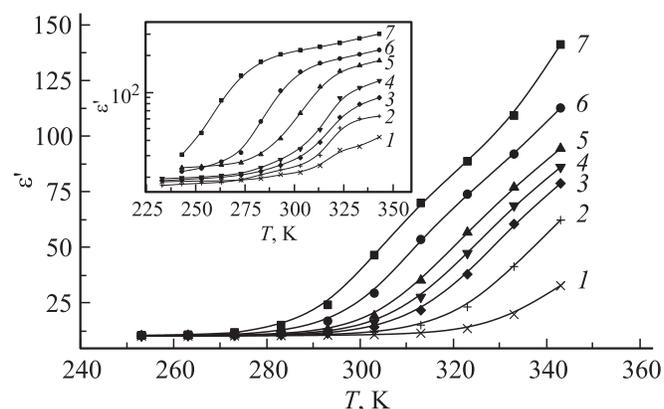
Теми же (перечисленными выше) причинами можно объяснить существенные различия поляризационных процессов, происходящих в исследуемых составах, которые наблюдаются в начале низкочастотной (НЧ) области:  $f > 1$  Гц. На рис. 2 приведена дисперсия функции  $\Delta tg \delta$ , представляющей максимальное приращение температурных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь для образцов обоих типов, снятых при разных частотах  $f$ :  $\Delta tg \delta = tg \delta_{max}(T) - tg \delta_{min}(T)$ .

Как для легированных, так и для беспримесных слоев характерно наличие трех областей на частотных зависимостях  $\Delta tg \delta$ . Первая приблизительно совпадает с ИНЧ диапазоном  $f < 1$  Гц, вторая — с началом НЧ интервала  $f \approx 1-5 \cdot 10^2$  Гц и третья —  $f > 5 \cdot 10^2$  Гц. Если в первой и третьей областях наблюдается отсутствие

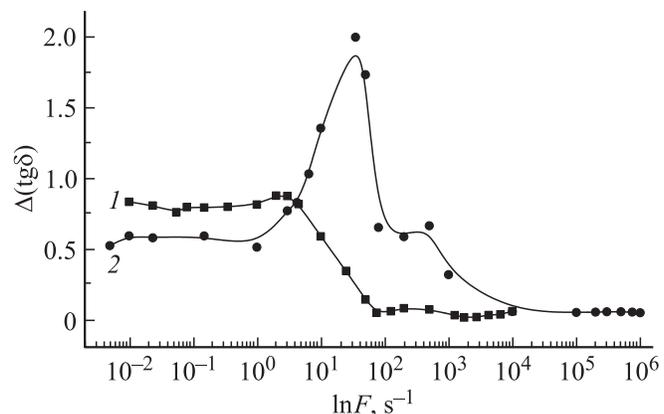
зависимости функции  $\Delta tg \delta$  от частоты и для  $As_2Se_3$ , и для  $As_2Se_3(Bi)$ , то при  $f \approx 1-5 \cdot 10^2$  Гц кривые  $\Delta tg \delta(f)$  имеют значительные различия.

Резкий спад функции  $\Delta tg \delta$  на этом частотном интервале у беспримесных пленок коррелирует с нивелированием „аномальных“ особенностей температурных зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости данных составов. В противоположность этому для  $As_2Se_3(Bi)$  при  $f \approx 1-5 \cdot 10^2$  Гц на кривой  $\Delta tg \delta(f)$  наблюдается максимум.

Согласно результатам работы [2], при этих частотах значительный заряд в приэлектродной области уже не успевает сформироваться. Тем не менее увеличение температуры продолжает „провоцировать“ в  $As_2Se_3(Bi)$  тепловое движение группы релаксаторов, ответственных за резкое возрастание диэлектрической проницаемости в ИНЧ диапазоне, и попытки обмена какой-то частью носителей заряда локализованными центрами. „Противоре-



**Рис. 1.** Температурная зависимость вещественной составляющей  $\epsilon'$  комплексной диэлектрической проницаемости для  $As_2Se_3$ ; частота  $f, Гц$ : 1 — 1.0, 2 —  $3.5 \cdot 10^{-1}$ , 3 —  $1.5 \cdot 10^{-1}$ , 4 —  $8 \cdot 10^{-2}$ , 5 —  $5.5 \cdot 10^{-2}$ , 6 —  $2.35 \cdot 10^{-2}$ , 7 —  $10^{-2}$ . На вставке —  $\epsilon'(T)$  для  $As_2Se_3(Bi)$ ; частота  $f, Гц$ : 1 — 10.0, 2 — 6.6, 3 — 4.25, 4 — 3.0, 5 — 1.0, 6 —  $1.5 \cdot 10^{-1}$ , 7 —  $5 \cdot 10^{-3}$  [2].



**Рис. 2.** Дисперсия максимального приращения тангенса угла диэлектрических потерь: 1 —  $As_2Se_3$ , 2 —  $As_2Se_3(Bi)$ .

чие“ между результатами влияния двух факторов внешнего воздействия ( $T, f$ ) и является причиной существенного увеличения диэлектрических потерь, характерного для легированных слоев в интервале  $f \approx 1-5 \cdot 10^2$  Гц, особенно при повышении температуры. Значительное же отличие хода кривой  $\Delta \operatorname{tg} \delta(f)$  беспримесных пленок обусловлено (как говорилось выше) меньшей „чувствительностью“ и, наверное, как следствие, большей „инертностью“ исходных составов по отношению к влиянию факторов внешнего воздействия.

Из дальнейшего анализа рис. 2 следует, что начиная с  $f \approx 10^2$  Гц для  $\text{As}_2\text{Se}_3$  и  $f \approx 10^4$  Гц для  $\text{As}_2\text{Se}_3(\text{Bi})$  наблюдается существенное уменьшение зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты. По всей видимости, это говорит об окончательном изменении механизма поляризационного процесса и о совпадении его природы для исследуемых соединений. Скорей всего, начиная с  $f \approx 10^4$  Гц диэлектрические явления в легированных слоях обусловлены действием собственных дефектов исходной матрицы  $\text{As}_2\text{Se}_3$  данного состава [1,2], в качестве которых выступают заряженные центры, обладающие отрицательной корреляционной энергией  $D^+, D^-$  [4]. Из этого можно сделать предположение, что при частотах  $f > 10^4$  Гц области с повышенной концентрацией примеси (кластеры) оказывают слабое влияние на процесс диэлектрической поляризации в  $\text{As}_2\text{Se}_3(\text{Bi})$ .

## Список литературы

- [1] Р.А. Кастро, В.А. Бордовский, Г.И. Грабко. Письма ЖТФ, **36** (17), 9 (2010).
- [2] Р.А. Кастро, В.А. Бордовский, Г.И. Грабко. Письма ЖТФ, **36** (20), 80 (2010).
- [3] Н.Н. Анисимова, В.А. Бордовский, Г.И. Грабко, Р.А. Кастро. ФТП, **44** (8), 1038 (2010).
- [4] *Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках*, под ред. К.Д. Цэндина (СПб., Наука, 1996).

*Редактор Л.В. Беляков*

## Investigation of dielectric processes in amorphous films $(\text{As}_2\text{Se}_3)_{(1-x)}\text{Bi}_x$

*R.A. Kastro, G.I. Grabko*

Herzen Russian State Pedagogical University,  
191186 Saint-Petersburg, Russia

**Abstract** A comparative analysis of dielectric polarization processes in undoped and Bi-doped layers of modified  $\text{As}_2\text{Se}_3$  was made. It was established that as similarity and difference of polarization phenomena are due to peculiarity of internal structure of investigated materials. A mechanism of observed effects in discussed.