

## УВЕЛИЧЕНИЕ ДРЕЙФОВОЙ ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ БРОМОМ

Исаев А. И., Казакова Л. П., Лебедев Э. А., Ятлинко И. И.

Результаты исследования переноса носителей заряда позволяют предположить, что происхождение локальных состояний, контролирующих дрейфовую подвижность дырок в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП) системы Se—As, связано с заряженными дефектами [1-3]. В этом случае возможно направленное управление величиной дрейфовой подвижности при легировании примесями, которые могут проявляться как заряженные центры [4].

Исследование влияния примеси на величину дрейфовой подвижности нами проводилось на ХСП состава  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$ . Выбор данного материала в качестве объекта исследования обусловлен тем, что селен с добавками мышьяка широко применяется в приборах, в которых используется свойство слоев ХСП изменять под действием света рельеф поверхностного потенциала. Добавки мышьяка существенно повышают кристаллизационную устойчивость материала, но значительно (на несколько порядков величины) уменьшают дрейфовую подвижность как электронов, так и дырок. В связи с этим задача повышения дрейфовой подвижности носителей заряда в ХСП системы Se—As имеет важное практическое значение.

В качестве примеси использовался бром. Предполагалось, что бром может проявляться как электроотрицательная примесь. Примесь вводилась в процессе синтеза, концентрация ее составляла  $5 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-1}$  ат%. Для измерений использовались образцы типа «сэндвич». Они представляли собой тонкие пленки ( $1 \div 4$  мкм), приготовленные методом термического испарения в вакууме на стеклянные подложки, на которые предварительно наносился нижний электрод из алюминия или  $\text{In}_2\text{O}_3$ . В качестве верхнего электрода служила полупрозрачная пленка алюминия, напыленная в вакууме. При изготовлении образцов производилось полное термическое испарение навески материала. Содержание примеси в образцах принималось равным содержанию брома в навеске.

Исследование дрейфовой подвижности проводилось методом измерения времени пролета [5, 6]. Время пролета носителей заряда через образец  $t_T$  определялось из зависимости фототока от времени  $I(t)$ . Значение дрейфовой подвижности рассчитывалось по формуле  $\mu = L^2/t_T V$ , где  $L$  — толщина образца,  $V$  — приложенное напряжение.

На рис. 1 приведены осциллограммы импульсов фототока, полученные при дрейфе электронов и дырок в ХСП состава  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$  с примесью брома. Время пролета определялось из осциллограмм по точке перегиба на кривой фототока, соответствующей выходу из образца дрейфующих носителей заряда. На рисунке время пролета отмечено стрелками.

Введение брома в ХСП состава  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$  приводило к изменению дрейфовой подвижности как электронов, так и дырок. При этом вид зависимостей  $I(t)$ , соответствующих дрейфу электронов, практически не изменялся. Что касается зависимостей  $I(t)$ , наблюдаемых при дрейфе дырок, то в легированных образцах на кривых фототока наблюдался участок «плато» при  $t \leq t_T$  (рис. 1, б). На образцах  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$  без примеси, содержащих малые количества брома, участок плато на зависимостях  $I(t)$ , соответствующих дрейфу дырок, был выражен не отчетливо. Этот факт, видимо, обусловлен влиянием захвата на глубокие ловушки.

В результате проведенной работы было получено существенное увеличение дрейфовой подвижности носителей заряда при легировании бромом ХСП состава  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$ . На рис. 2 представлены экспериментально установленные зависимости величины дрейфовой подвижности электронов и дырок от концентрации при-

меси брома, введенной в ХСП. Из рис. 2 видно, что полученные зависимости имеют максимум. Дрейфовая подвижность электронов возрастает от  $8 \cdot 10^{-5}$  в исходном материале до  $10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  в максимуме при содержании брома  $10^{-4}$  ат% (рис. 2, кривая 1). При дальнейшем увеличении концентрации брома происходило уменьшение подвижности электронов.

Как видно из рис. 2 (кривая 2), особенно большое увеличение (более чем на 2 порядка) наблюдалось для дрейфовой подвижности дырок в легированных образцах. Ее значение возрастает от  $5 \cdot 10^{-5}$  в исходном материале до  $3 \times 10^{-2} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при содержании брома  $10^{-3}$  ат%. Дальнейшее увеличение концентрации брома приводит к уменьшению подвижности дырок.

Температурные измерения показали, что зависимость дрейфовой подвижности от температуры в легированных образцах носит активационный характер. Энергия активации дрейфовой подвижности составляла 0.46 эВ для электронов

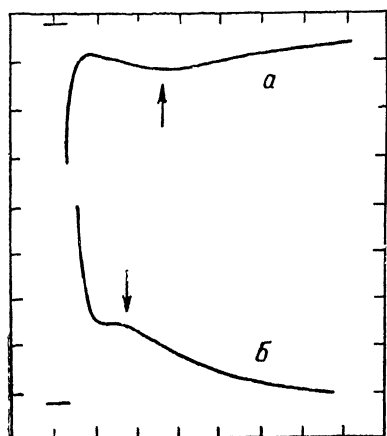


Рис. 1. Осциллограммы импульсов фототока при дрейфе электронов (а) и дырок (б) в ХСП состава  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$ , содержащего  $10^{-2}$  ат% брома.

Напряженность электрического поля  $E = 1 \cdot 10^4$  В/см. По осям абсцисс — 50 (а), 20 мкс/дел (б).

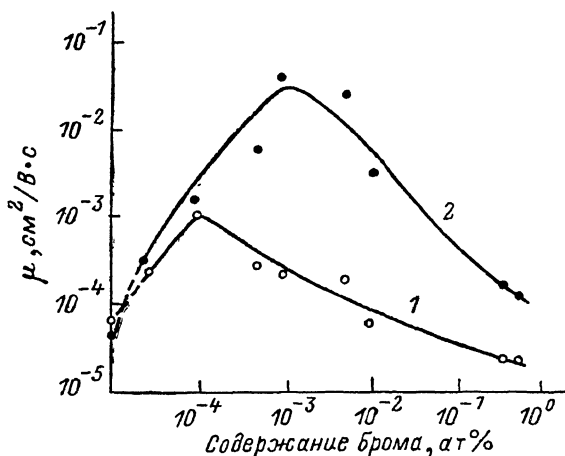


Рис. 2. Зависимость дрейфовой подвижности электронов (1) и дырок (2) от содержания брома в  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$ .

$E = 1 \cdot 10^4$  В/см. Точки пересечения кривых с осью ординат соответствуют значениям дрейфовой подвижности в нелегированном материале.

при содержании брома в  $\text{Se}_{95}\text{As}_5$   $10^{-2}$  ат% и 0.4 эВ для дырок при содержании брома  $5 \cdot 10^{-1}$  ат%.

Увеличение дрейфовой подвижности в ХСП может быть связано с уменьшением концентрации локальных состояний, контролирующих ее величину. Если предположить, что бром действует как заряженная примесь, то можно привлечь известные представления о влиянии заряженной примеси на концентрацию собственных заряженных дефектов  $C_3^+$  и  $C_1^-$ , развитые в работе [4]. Согласно этим представлениям, при добавлении отрицательно заряженной примеси  $A^-$  должен выполняться закон электронейтральности, который для концентраций заряженных примесей и дефектов представляется в следующем виде:  $[A^-] + [C_1^-] = [C_3^+]$ . Количественное соотношение между концентрациями заряженных дефектов, образующихся из исходных нейтральных дефектов  $C_3^0$  по реакции  $2C_3^0 \rightarrow C_3^+ + C_1^-$ , в соответствии с законом действующих масс записывается в виде  $[C_3^+][C_1^-] = [C_3^0]^2 = \text{const}$ . Согласно последнему уравнению и уравнению электронейтральности, при введении электроотрицательной примеси концентрация положительно заряженных собственных дефектов  $[C_3^+]$  должна возрастать, а концентрация отрицательно заряженных дефектов  $[C_1^-]$  должна уменьшаться. Полагая, что дефекты  $C_3^+$  контролируют дрейфовую подвижность электронов, а  $C_1^-$  — дрейфовую подвижность дырок, следует ожидать при увеличении концентрации примеси  $A^-$  увеличения подвижности дырок и уменьшения подвижности электронов, поскольку дрейфовая подвижность обратно пропорциональна концентрации контролирующих ее локальных состояний.

Из рассмотрения экспериментально полученных результатов видно, что при малых концентрациях примеси брома поведение подвижностей носителей заряда иное. Действительно, из рис. 2 видно, что при содержании брома до  $10^{-4}$  ат% происходит одновременное возрастание дрейфовых подвижностей электронов и дырок при увеличении концентрации брома. Такое поведение подвижностей может указывать на то, что бром в малых количествах проявляется не как заряженная примесь, а как химически активный элемент, влияние которого приводит к уменьшению концентрации исходных нейтральных дефектов  $C_3^0$ , а следовательно, и к уменьшению концентраций  $[C_3^+]$  и  $[C_1^-]$ .

Действие брома как отрицательно заряженной примеси, возможно, происходит в области его концентраций от  $10^{-4}$  до  $10^{-3}$  ат%, при которых наблюдаются возрастание дрейфовой подвижности дырок и уменьшение дрейфовой подвижности электронов.

При более высоких концентрациях брома (выше  $10^{-3}$  ат%) происходит уменьшение подвижности как электронов, так и дырок (рис. 2). Уменьшение дрейфовой подвижности электронов находится в соответствии с изложенными выше представлениями о том, что легирование отрицательно заряженной примесью приводит к увеличению концентрации дефектов  $C_3^+$ , контролирующих подвижность электронов.

Что касается дрейфовой подвижности дырок, то ее уменьшение при концентрациях брома выше  $10^{-3}$  ат% можно объяснить тем, что в данном случае концентрация состояний, соответствующих отрицательно заряженной примеси брома  $Bg^-$ , превышает концентрацию собственных заряженных дефектов  $C_1^-$ . В связи с этим дрейфовую подвижность дырок начинает контролировать захват на центры  $Bg^-$ , и, следовательно, с увеличением содержания брома подвижность дырок уменьшается.

Установленная в эксперименте энергия активации дрейфовой подвижности дырок в образцах с максимальным содержанием брома свидетельствует о том, что энергетическое положение уровней центров  $Bg^-$  характеризуется энергией 0.4 эВ выше края валентной зоны.

Главным результатом проведенной работы является обнаружение сильного увеличения дрейфовой подвижности носителей заряда при малых добавках примеси, что дает возможность направленного изменения величины дрейфовой подвижности носителей заряда в ХСП. Для окончательного выяснения механизма влияния примеси на дрейфовую подвижность требуется проведение дальнейшей работы.

Авторы выражают благодарность К. Д. Цэндину за полезное обсуждение результатов работы.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Street R. A., Mott N. F. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 35. N 22. P. 1293—1297.
- [2] Kastner M., Adler D., Fritzsche H. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37. N 21. P. 1504—1510.
- [3] Архипов В. И., Казакова Л. П., Лебедев Э. А., Руденко А. И. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 4. С. 724—727.
- [4] Fritzsche H., Kastner M. // Phil. Mag. B. 1978. V. 37. N 3. P. 285—292.
- [5] Spear W. E. // J. Non-Cryst. Sol. 1969. V 1. N 3. P. 197—204.
- [6] Казакова Л. П., Коломиец Б. Т., Лебедев Э. А., Таурайтене С. А. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 2. С. 274—278.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 27.06.1988  
Принято к печати 21.07.1988