

**ДРЕЙФОВАЯ ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В
ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМАХ Se – Te**

**С.И.МЕХТИЕВА, А.И.ИСАЕВ, Э.А.МАМЕДОВ,
Г.К.АКБЕРОВ, В.З.ЗЕЙНАЛОВ**

*Институт Физики НАН Азербайджана
AZ 1143, пр. Г.Джавида 33, Баку*

Исследовано влияние изменения химического состава, температуры и напряженности электрического поля, а также примеси хлора на величину дрейфовой подвижности носителей заряда в ХСП системы $Se_{100-x}Te_x$ ($0 < x < 10$). Показано, что в ХСП системы Se – Te происхождение локализованных состояний, контролирующих перенос носителей заряда, зависит от содержания Te. Эти состояния при малом содержании Te (до 2 ат.%) обладают зонным происхождением и являются нейтральными, а при больших концентрациях связаны с заряженными дефектами (D^+ и D^- - центрами). Определены энергия активации и концентрация указанных локализованных состояний.

ВВЕДЕНИЕ

Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) на основе селена в течение длительного времени служили объектом многочисленных исследований [1,2]. Это связано с одной стороны, с многочисленным практическим применением в инфракрасной оптике, ксерографии и микроэлектронике ХСП системы на основе селена, с другой стороны, с обсуждением в литературе о возможности существования сверхпроводящего состояния в системе биполярнон малого радиуса (БМР) [3-7]. Преобладающим типом собственных дефектов в ХСП материалах являются дефекты с отрицательной эффективной энергией корреляции (U^- - центры) [1-2, 8-12], которым энергетически выгодно существовать в виде заряженных точечных дефектов D^+ и D^- . Два заряженных состояния U^- - центра (D^+ и D^-) являются по своей сути классическими представителями БМР [13]. Условие существования сверхпроводящего состояния в системе БМР существенно зависит от их концентрации. Возможность управления концентрацией U^- - центров изменением химического состава, а также введением примесей, способных проявляться в виде заряженных дефектов [14-18], позволяет надеяться на создание сверхпроводящего материала на базе ХСП.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния химического состава и примесей хлора на параметры (концентрацию и энергию активации) U^- - центров в ХСП системы Se – Te. С этой целью проводились измерения дрейфовой подвижности носителей заряда ХСП состава $Se_{100-x}Te_x$ ($0 < x < 10$).

Выбор объекта для исследования обусловлен тем, что LP- и σ^* -орбитали теллура попадают в щель подвижности селена [22], и добавление Te в Se приводит к изменению краев разрешенных зон, вследствие чего можно ожидать изменения подвижности, как электронов, так и дырок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалом для исследований служили ХСП состава $Se_{100-x}Te_x$ ($0 < x < 10$). Примесь хлора вводилась в процессе синтеза, концентрация не превышала 0,1 ат.%.
1

Образцы для измерений имели структуру типа “сэндвич” и представляли собой пленки толщиной $1 \div 4 \mu\text{м}$, приготовленные методом термического испарения в вакууме (при остаточном давлении $\sim 10^{-6}$ мм.рт.ст.) на стеклянные подложки, на которые предварительно наносился нижний электрод из In_2O_3 или алюминия. В качестве верхнего электрода служила напыленная в вакууме полупрозрачная пленка алюминия. Концентрация примеси в пленках принималась равной содержанию ее в навеске.

Для исследования дрейфовой подвижности использовалась методика измерения времени пролета носителей заряда через образец [19]. Инжекция носителей заряда в образец осуществлялась импульсом сильно поглощаемого излучения с длиной волны $0.33 \mu\text{м}$ и длительностью $\sim 8 \text{нс}$, получаемым от лазера ЛГИ – 21.

Время пролета носителей заряда через образец τ_t определялось из зависимости фототока от времени. Значение дрейфовой подвижности рассчитывалось по формуле $\mu = L/\tau_t F$, где L – толщина образца, F – напряженность электрического поля.

Принимая, что перенос носителей заряда контролируется захватом носителей на дискретный уровень ловушек, расположенный на расстоянии ΔE от края разрешенной зоны, выражение для дрейфовой подвижности записывается в виде:

$$\mu = \mu_0 (N_0/N_t) \exp(-\Delta E/kT), \quad (1)$$

где μ_0 – подвижность носителей заряда в разрешенной зоне, N_0 и N_t эффективная плотность состояний в разрешенной зоне и плотность локализованных состояний соответственно [20].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На Рис. 1 показана зависимость дрейфовой подвижности от концентрации введенных атомов теллура в ХСП системы Se – Te. Как видно из рисунка, с ростом концентрации атомов Te уменьшается дрейфовая подвижность, как электронов, так и дырок. Измерения температурной зависимости дрейфовой подвижности в ХСП системы Se – Te были проведены в интервале температур 260 – 303 К. Ограничение температурного диапазона измерений связано с предотвращением процесса кристаллизации при высоких температурах. В Таблице 1 даны значения энергии активации ΔE в ХСП системы Se – Te.

Таблица 1.

Значения энергии активации для ХСП системы Se – Te, полученные из температурной зависимости дрейфовой подвижности носителей заряда.

Состав ХСП	Дырки, Δ (eV)	Электроны, ΔE (eV)
Se	0.24	0.33
$\text{Se}_{99.5} \text{Te}_{0.5}$	0.26	0.33
$\text{Se}_{99} \text{Te}_1$	0.27	0.34
$\text{Se}_{98.5} \text{Te}_{1.5}$	0.27	0.38
$\text{Se}_{97.5} \text{Te}_{2.5}$	0.27	0.38
$\text{Se}_{95} \text{Te}_5$	0.31 – 0.33	0.43 – 0.45
$\text{Se}_{90} \text{Te}_{10}$	0.31 – 0.33	0.47 – 0.49

Добавление Te в Se увеличивает энергию активации носителей заряда обоих знаков. Кроме того, при этом увеличивается дисперсия, т. е. форма импульса

фототока значительно отклоняется от прямоугольной, происходит размытие пакета носителей заряда, причем с ростом содержания Те степень размытости пакета увеличивается. При концентрации Те, превышающей 5 ат.%, визуальное определение времени пролета, как для дырок, так и для электронов становится невозможным.

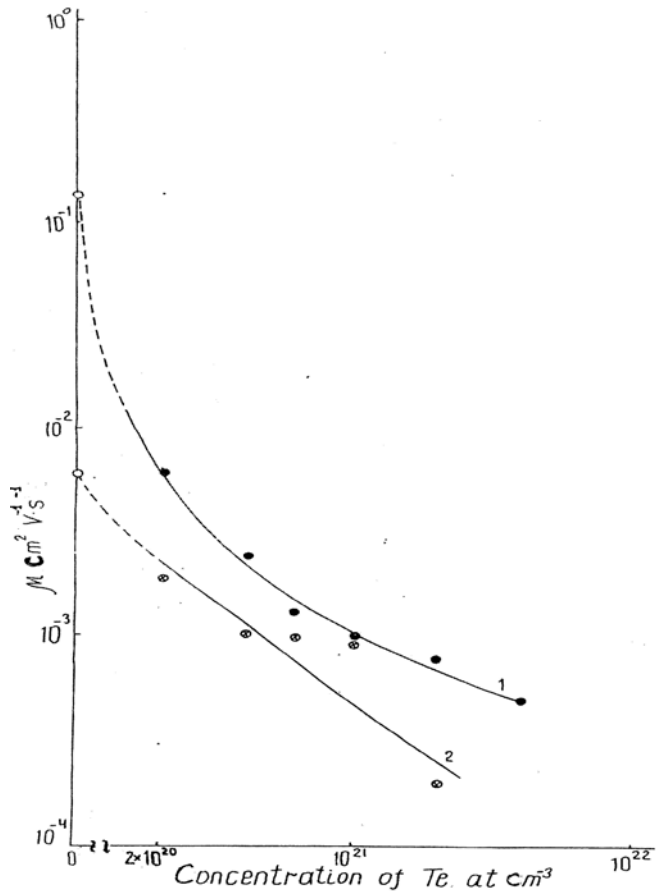


Рис.1.

Зависимость дрейфовой подвижности дырок (1) и электронов (2) в ХСП системы Se-Te от концентрации введенных атомов теллура. Незакрашенные точки соответствуют стеклообразному селену.

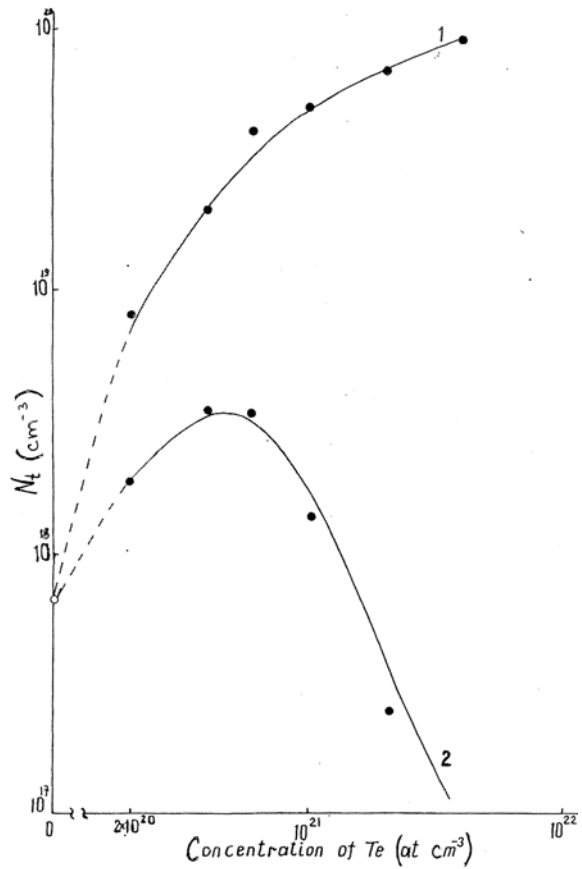


Рис.2.

Зависимость концентрации локальных состояний, контролирующей дрейфовую подвижность дырок (1) и электронов (2), от концентрации атомов теллура в ХСП системы Se-Te. Незакрашенная точка соответствует стеклообразному селену.

Принимая $\mu_0=10\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$; $N_c=10^{20}\text{cm}^{-3}$ [21], по формуле (1) вычислена концентрация локализованных состояний, контролирующей дрейфовую подвижность носителей заряда. На Рис.2 показаны зависимости концентрации локализованных состояний от концентрации введенных атомов Те в ХСП системы Se – Te. Как видно из Рис.2, при значениях концентрации Те не превышающих 2ат.%, с ростом содержания Те, в ХСП системы Se – Te монотонно увеличивается концентрация локальных состояний, контролирующей перенос, как электронов так и дырок. При дальнейшем увеличении концентрации Те, наблюдается рост концентрации локализованных состояний, контролирующей перенос дырок, и одновременное уменьшение концентрации локализованных состояний, контролирующей перенос электронов.

ДРЕЙФОВАЯ ПОДВИЖНОСТЬ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ
СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СИСТЕМАХ Se – Te

Результаты измерения зависимости дрейфовой подвижности электронов и дырок в ХСП системы Se – Te от концентрации введенных атомов примеси хлора представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Дрейфовая подвижность носителей заряда в
ХСП системы Se–Te с примесью хлора.

Состав ХСП	Подвижность дырок	Подвижность электронов
	$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5$	6.2×10^{-3}	3×10^{-4}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.001}$	6.2×10^{-3}	4×10^{-4}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.01}$	8.5×10^{-3}	2×10^{-4}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.05}$	3.8×10^{-2}	-
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.1}$	4.6×10^{-5}	-

Как видно из Таблицы 2, влияние примеси хлора на дрейф носителей заряда в ХСП системы Se – Te имеет сложный характер. Малое содержание примеси хлора (до 0,05ат.%) приводит к росту подвижности дырок (на порядок) и, одновременно, к уменьшению подвижности электронов (при концентрации примеси хлора более 0,05ат.%, из-за существования сильного захвата электронов локализованными состояниями, не удалось определить подвижность электронов). Температурные измерения показали, что энергия активации дрейфовой подвижности не зависит от присутствия примеси хлора и имеет такое же значение, как для $\text{Se}_{95}\text{Te}_5$. Концентрация локализованных состояний, контролирующих дрейфовую подвижность носителей заряда, вычислена по формуле (1) и результаты представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Концентрация локализованных состояний, контролирующих перенос носителей заряда в ХСП системы Se – Te с примесью хлора.

Состав ХСП	Концентрация локализованных состояний, контролирующих перенос дырок	Концентрация локализованных состояний, контролирующих перенос электронов
	cm^{-3}	cm^{-3}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5$	1.7×10^{18}	1.3×10^{18}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.001}$	1.7×10^{18}	1×10^{18}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.01}$	1.2×10^{18}	2×10^{18}
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.05}$	2.7×10^{17}	-
$\text{Se}_{95}\text{Te}_5\text{Cl}_{0.1}$	1×10^{18}	-

На Рис.3 представлены зависимости дрейфовой подвижности электронов (а) и дырок (б) от напряженности приложенного электрического поля для ХСП системы Se – Te. Как видно из рисунка, ярко выраженная полевая зависимость наблюдается только в образцах, содержащих более 2ат.% Te.

Полученные результаты позволяют высказать ряд соображений о природе локализованных состояний, контролирующих перенос носителей заряда в ХСП системы Se–Te. При малом содержании Te (до 2ат.%) в ХСП системы Se–Te, уменьшение значения дрейфовой подвижности электронов и дырок, увеличение концентрации локализованных состояний, контролирующих перенос носителей

заряда обоих знаков, низкое значение энергии активации дрейфовой подвижности, а также слабая полевая зависимость дрейфовой подвижности, свидетельствуют об электронейтральности состояний, контролирующих перенос в ХСП материалах. Как было сказано выше, LP и σ^* -орбитали теллура попадают в щель подвижности селена, вследствие чего, должны изменяться края валентной зоны и зоны проводимости, т.е. добавление теллура в селен должно сильно влиять

на «хвосты» плотности состояний и, следовательно, на дрейфовую подвижность носителей заряда обоих знаков. Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что при введении в селен теллура в относительно малых количествах (до 2ат.%), изменение энергетического спектра состояний происходит согласно гипотезе Кастнера [22] и свидетельствует о зонном происхождении локализованных состояний, контролирующих дрейфовую подвижность в этом материале. Такие состояния являются нейтральными.

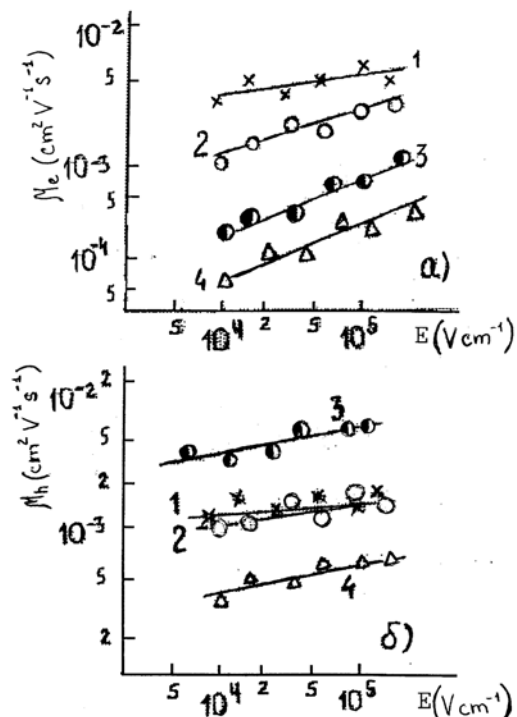


Рис.3

Зависимость дрейфовой подвижности электронов (а) и дырок (б) от электрического поля для ХСП системы Se-Te. В скобках даны значения n в выражении $\mu \sim E^n$: 1-Se_{99,5}Te_{0,5} ($n=0.14$); 1-Se₉₈Te₂ ($n=0.33$); 3-Se₉₅Te₅ ($n=0.41$); 4-Se₉₃Te₇ ($n=0.43$).

Ниже перечисленные экспериментальные факты свидетельствуют в пользу того, что при большом содержании Te (более 2ат.%), в ХСП системы Se-Te перенос носителей заряда контролируется заряженными дефектами:

-относительно большие значения энергии активации дрейфовой подвижности носителей заряда, т.е. энергия активации дрейфовой подвижности дырок составляет приблизительно половину энергии активации проводимости;

-с ростом содержания Te в ХСП системы Se-Te, увеличение концентрации локализованных состояний, контролирующих дрейфовую подвижности дырок, и одновременное уменьшение концентрации локализованных состояний, контролирующих дрейфовую подвижность электронов;

-увеличение дрейфовой подвижности дырок и уменьшение дрейфовой подвижности электронов при введении примеси хлора;

-наблюдение ярко выраженной полевой зависимости дрейфовой подвижности носителей заряда при больших концентрациях теллура.

Согласно существующим представлениям, дефекты, контролирующие подвижность, могут образовываться ненасыщенными связями [9,11,12] или сильно растянутыми связями (в модели мягких потенциалов [23,24]). В материалах с сильным электрон-фононным взаимодействием собственным дефектам энергетически выгодно быть заряженными [9,11,12], и они образуются из нейтральных состояний по реакции



Образование заряженных собственных состояний возможно и в модели мягких потенциалов [23,24]. Заряженные состояния являются ловушками для

носителей заряда. Если дрейфовая подвижность контролируется захватом носителей заряда на дискретный уровень ловушек, расположенный на расстоянии E от края разрешенной зоны, то в соответствии с формулой (1) можно записать

$$\mu \sim 1/N_t. \quad (3)$$

Как уже было сказано, при введении теллура в селен, изменяется плотность состояний на «хвосте» у краев разрешенных зон. При малых концентрациях Te образуются локализованные изолированные состояния внутри запрещенной зоны. При этом транспорт носителей заряда контролируется двумя дискретными наборами ловушек, энергия которых представлена в таблице 1. Первый набор ловушек присущ селену, второй набор обусловлен влиянием теллура и имеет большую энергию активации, чем первый. При больших концентрациях Te, второй набор локализованных состояний, из-за взаимодействия состояний друг с другом, образует примесную зону. При этом энергетическое расстояние между D^+ состояниями, имеющимися в селене, и состояниями, обусловленными присутствием теллура, уменьшается, и, поэтому, атомы Te легко отдают электрон:



В результате этого, происходит уменьшение концентрации D^+ - центров и увеличение концентрации D^- - центров.

Полевая зависимость дрейфовой подвижности носителей заряда обоих знаков для всех исследованных образцов подчиняется степенному закону:

$$\mu \sim E^n, \quad (5)$$

где E – напряженность внешнего электрического поля. Значение n увеличивается с ростом содержания Te в ХСП системы Se – Te. Полевая зависимость дрейфовой подвижности $\mu(E)$ в стеклообразных полупроводниках исследована авторами работ [25-27]. В стеклообразном селене зависимость дрейфовой подвижности от напряженности электрического поля не наблюдалась [25]. Исследования, проведенные нами, показали, что дрейфовая подвижность носителей заряда в селене и в ХСП системы Se – Te с малым содержанием Te (до 2ат.%) очень слабо зависит от напряженности приложенного электрического поля. Такое поведение дрейфовой подвижности так же свидетельствует об электронейтральности локализованных состояний, контролирующих дрейфовую подвижность носителей заряда в указанных ХСП материалах. Появление ярко выраженной полевой зависимости в ХСП системы Se – Te с большим содержанием Te (более 2ат.%) можно объяснить в рамках модели заряженных дефектов. Неравномерное распределение D^+ и D^- - центров в указанных ХСП составах приводит к флуктуации электростатического потенциала и возникновению энергетического барьера, препятствующего дрейфу носителей заряда. Электрическое поле, уменьшая высоту барьеров, облегчает освобождение носителей заряда из барьеров.

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что в ХСП системы Se–Te происхождение локализованных состояний, контролирующих перенос носителей заряда, зависит от содержания Te. Локализованные состояния, контролирующие перенос носителей заряда, при малом содержании (до 2ат.%) обладают зонным происхождением и являются нейтральными, а при большом содержании связаны с заряженными дефектами (D^+ и D^- - центров).

1. Н.Мотт., Э.Девис, *Электронные процессы в некристаллических веществах*. М. Мир, (1982) 62.
2. *Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках*. Отв. Редактор К.Д. Цэндин Сан. – Петербург «Наука», (1996).
3. В.Р.Попов, К.Д.Тsendin, *Techn. Phys. Lett.*, **24** (1998) 265.

4. A.S.Alexandrov, J.Ranninger, *Phys. Rev. B*, **23** (1981) 1726.
5. N.F.Mott, *Physica C*, **205** (1993) 191.
6. B.K.Chakraverty, J.Ranninger, D.Feinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998) 433.
7. A.S.Alexandrov, *Phys. Rev., B*, **53** (1996).
8. P.W.Anderson, *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1975) 953.
9. R.A.Street, N.F.Mott, *Phys. Rev. Lett.*, **35** (1975) 1293.
10. R.A.Street, E.A.Davis, N.F. Mott, *Phil. Mag., B*, **32** (1975) 961.
11. M.Kastner, D.Adler, H.Fritzsche, *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1976) 1504.
12. H.Fritzsche, M. Kastner, *Phil. Mag., B*, **37** (1978) 285.
13. Л.П.Казакова, К.Д.Цэндин, *ФТП*, **33** (1999) 866.
14. Л.П.Казакова, Э.А.Лебедев, А.И.Исаев, С.И.Мехтиева, Н.Б.Захарова, И.И.Ятлинко, *ФТП*, **27** (1993) 959.
15. А.И.Исаев, Л.П.Казакова, Э.А.Лебедев, И.И.Ятлинко, *ФТП*, **23** (1989) 23.
16. A.I.Isayev, S.I.Mekhtieva, A.K.Rzayev, *Turkish. J. of Physics*, **22** (1998) 263.
17. S.I.Mekhtieva, N.I.Ibraqimov, A.I.Isayev, V.Z.Zeynalov, E.A.Mamedov, *Turkish J. of Physics*, **26** (2002) 449.
18. L.P.Kazakova, E.A.Lebedev, N.B.Zakharova, I.I.Yatlinko, A.I.Isayev, S.I.Mekhtieva, *J. of Non – Crystalline solids* **167** (1994) 65.
19. W.E.Spear, *J. Non–Crist. Sol.*, **1** (1969) 197.
20. Pfister, M.Morgan, *Phil. Mag.*, **41** (1980) 209.
21. Г.Б.Абдуллаев, Д.Ш.Абдинов, *Физика селена, Баку, Элм*, (1975).
22. М.И.Клингер, В.Г.Карпов, *ЖЭТФ*, **82** (1982) 687.
23. F.N.Ignatev, V.G.Karpov, M.I.Klinger, *J. Non – Crist. Sol.*, **55** (1983) 307.
24. S.M.Vaezi–Nejad, C.Vihasz, *Sci. Technol.*, **2** (1987) 809.
25. H.Natio, K.Mtomura, M.Okuda, T.Nakau, T.Matsushita, *J. Appl. Phys.*, **22** (1983) 4531.
26. M.E. Sharge, *Phys. Rev.*, **2**, (1970), 5025.

HALOQENLİ ŞÜŞƏVARI YARIMKEÇİRİCİ Se-Te SİSTEMİNDƏ YÜKDAŞIYICILARIN DREYF YÜRÜKLÜYÜ

S.İ.MEHDIYEVA, A.İ.İSAYEV, E.A.MƏMMƏDOV, H.K.ƏKPƏROV, V.Z.ZEYNALOV

Haloqenli şüşəvari yarımkeçirici (HŞY) $Se_{100-x}Te_x$ ($0 < x < 10$) sistemində yükdaşıyıcıların dreif yürüklüyünə kimyəvi tərkibin, xlor aşqarlarının, temperaturun və tətbiq olunan elektrik sahəsinin təsiri öyrənilmişdir. Eksperimental faktların araşdırılması nəticəsində göstərilmişdir ki, HŞY Se-Te sistemində yükdaşıyıcıların köçürülmə prosesini idarə edən lokal halların təbiəti tellurun miqdarından asılıdır. Tellurun miqdarının kiçik qiymətlərində (<2%) zona mənşəli olub, elektrik cəhətdən neytraldırlar. Tellurun miqdarının böyük qiymətlərində isə həmin lokal halları yüklü defektlər tərəfindən yaradılır (D^+ və D^-). Lokal halların aktivləşmə enerjisi və konsentrasiyası hesablanmışdır.

CARRIER DRIFT MOBILITY OF Se-Te CHALCOGENIDE GLASSY SEMICONDUCTORS

S.I.MEKHTIEVA, A.I.ISAEV, E.A.MAMEDOV, H.K.AKPEROV, V.Z.ZEYNALOV

Influence of chemical composition varying, temperature and electrical field changing, and Cl impurity embedding to the carrier drift mobility of $Se_{100-x}Te_x$ ($0 < x < 10$) system has been studied. It has been shown that the parentage of localized states, which control charge transport, depends on Te concentration. At low Te concentration (<2%) these states have a band parentage and are neutral. At the same time at high concentration of Te they are related to charge defects (D^+ , D^- -centers). Activation energy and concentration of localized states has been determined.

Редактор: Дж.Абдинов