

Инжекционные токи в аморфных твердых растворах системы Se—S

© Н.З. Джалилов[¶], Г.М. Дамиров

Институт физики Национальной академии наук Азербайджана,
AZ-1143 Баку, Азербайджан

(Получена 3 марта 2009 г. Принята к печати 26 марта 2009 г.)

В результате проведенных исследований вольт-амперных характеристик аморфных пленочных образцов системы $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) установлено, что перенос носителей заряда в исследованных образцах осуществляется по механизму токов монополярной инжекции, ограниченных пространственными зарядами при участии двух групп ловушек захвата: мелких (E_{t1}), соответствующих заряженным собственным дефектам C_1^- , обусловленных оборванными связями в селене; глубоких E_{t2} , соответствующих также заряженным собственным дефектам C_3^+ в селене. Показано, что изменение состава системы Se—S сильно влияет как на механизм транспорта зарядов, так и на параметры ловушек — на их энергетические положения и концентрации.

PACS: 73.40.Lq, 73.61.Jc, 61.43.Dq

1. Введение

В настоящее время установлено, что преобладающим типом собственных дефектов в аморфных и стеклообразных халькогенидных полупроводниках (ХСП) являются дефекты с отрицательной эффективной энергией корреляции (U^- -центры) [1–8]. Это связано с тем, что в аморфных и стеклообразных халькогенидных стеклах гетеролитический разрыв химической связи с образованием положительно (D^+) и отрицательно (D^-) заряженных дефектов энергетически более выгоден, чем гомолитический разрыв связи, который ведет к возникновению центров с неспаренными спинами. Возникновение отрицательных значений эффективной энергии корреляции электронов в халькогенидных аморфных и стеклообразных полупроводниках объясняют главным образом воздействием незанятых положительно заряженных центров, образующихся при гетеролитическом разрыве химической связи, со свободной неподделенной парой электронов соседних атомов.

В ряду S, Se, Te: сера — хороший изолятор, селен — полупроводник, теллур обладает высокой проводимостью. Твердые растворы на их основе позволяют получить материалы, которые обладают разнообразными физическими свойствами.

В расплавленном состоянии между серой и селеном образуются гомогенные растворы, при кристаллизации которые могут образовывать ряд твердых растворов [9]. Учитывая, что в поведении серы и селена много общего, предполагается, что они способны образовывать смешанные молекулы типа SSe.

Добавление в жидкий расплав селена Te приводит к укорачиванию цепей [10], поскольку связь Se—Te слабее, чем Se—Se, и кристаллизация при охлаждении облегчается, а при добавлении в расплав S, можно сказать, произойдет обратное, так как связь Se—S сильнее связи Se—Se. Аморфный селен представляет собой смесь молекул (замкнутых колец) и полимерных цепей. Сера,

селен и теллур имеют координационное число, равное 2. В ряду S, Se и Te средние мольные энергии связи уменьшаются, а температура плавления и плотность при этом растут. Это показывает, что чем больше значения энергии связей между атомами в цепи, тем меньше значения энергии связей между цепями.

В настоящее время установлено, что с изменением химического состава, а также с введением примесей можно направленно изменять электронные свойства халькогенидных стеклообразных полупроводников. Это дает возможность, изменяя в них концентрации заряженных дефектов (U^{-1} -центров), управлять их электрическими, оптическими и фотоэлектрическими свойствами, что представляет интерес для практического применения. Некристаллические халькогениды используются в электронографии (ксерографии), для записи оптической информации, в электрических переключателях и запоминающих устройствах [11–17].

Данная работа содержит результаты исследования вольт-амперных характеристик образцов аморфных твердых растворов системы $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$).

Цель данной работы заключалась в изучении характера явления переноса заряда в аморфных твердых растворах системы $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$ методом тока, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ). Известно, что метод ТОПЗ позволяет определить параметры ловушек, такие как энергетическое положение в запрещенной зоне и их концентрацию в некристаллических полупроводниках [18,19].

2. Методика эксперимента

Для получения твердых растворов селен—сера был взят селен чистотой B_5 и черенковая чистая сера, взвешанные с точностью до 0.0001 г. При синтезе раствора из расплава, для лучшей гомогенизации составляющих их частей, был использован вибрационный метод. Ампулы в течение 3 ч подвергались тряске при

[¶] E-mail: gafil@physics.abaz

температуре 280°C, т.е. на $\sim 60^\circ\text{C}$ выше температуры плавления селена. Затем термическим напылением в вакууме ($\sim 10^{-6}$ мм рт. ст.), методом горячей стенки на подложках из покровного стекла, были получены пленки толщиной ~ 3 мкм. В качестве инжектирующего контакта нами был использован Те, нанесенный испарением в вакууме на торцевые стороны образца, а в качестве обычного контакта служил Al. Синтез всех составов был произведен при одинаковых условиях.

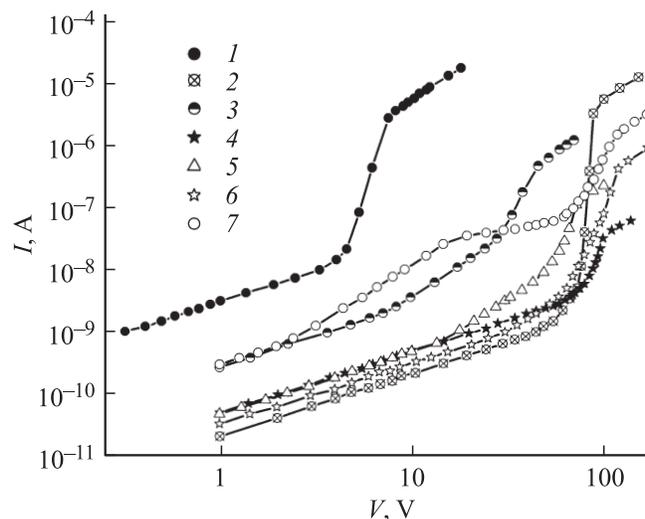
Вольт-амперные характеристики исследованных образцов измерялись на постоянном токе, в темноте. Полярность приложенного напряжения „минус“ была на металлическом электроде Al, а „плюс“ — на электроде Те. Представленные далее вольт-амперные характеристики получены измерениями стационарных значений тока при заданных значениях напряжения на образцах с помощью электрометрического усилителя, так как образцы имели в среднем удельное сопротивление, равное $\sim 10^{13}$ Ом·см.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованных структур системы $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$, измеренные при комнатной температуре, показаны на рисунке. Как видно, в двойном логарифмическом масштабе ВАХ образцов различных составов состоит из нескольких отчетливо выраженных линейных участков различной крутизны, которые могут быть аппроксимированы степенными зависимостями тока (I) от напряжения (V). ВАХ образцов состава $\text{Se}_{0.5}\text{S}_{0.5}$ состоит из четырех участков. Образцы всех других исследованных составов имеют ВАХ, состоящую из трех участков. ВАХ всех образцов сначала следует омическому закону, т.е. $I \propto V$, а далее следует участок, который может быть охарактеризован квадратичной зависимостью тока от напряжения $I \propto V^2$. После этого для всех образцов наблюдается резкий рост тока от напряжения, затем опять следует квадратичный участок тока от напряжения. Для образцов состава $\text{Se}_{0.5}\text{S}_{0.5}$ после омического участка, в отличие от других образцов, ток меняется не по квадратичному закону, но затем и для этого образца ток тоже меняется от напряжения, как и в образцах других составов.

Полученные результаты показывают, что перенос тока в исследованных аморфных образцах системы Se—S связан с током, ограниченным пространственным зарядом, с ловушками для захвата носителей в запрещенной зоне [18]. Особенности ВАХ показывают, что исследованные образцы являются высокоомными материалами p -типа проводимости с двумя группами ловушечных центров захвата, расположенных в нижней половине запрещенной зоны исследованных образцов.

Эти данные понятны, если учесть, что при термодинамическом равновесии в исследованных образцах



Вольт-амперные характеристики образцов пленочных аморфных твердых растворов системы $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$ состава x : 1 — 0, 2 — 0.05, 3 — 0.1, 4 — 0.2, 5 — 0.3, 6 — 0.4, 7 — 0.5.

системы Se—S присутствует некоторое количество электронов проводимости и их концентрации определяются положением уровня Ферми в запрещенной зоне, и это в свою очередь задается концентрациями и энергиями ионизации центров ловушек E_{t1} и E_{t2} . Причем нижние уровни почти полностью заполнены дырками, а верхние уровни почти полностью свободны от дырок.

При приложении к структурам небольшого напряжения, дырки, инжектируемые в образцы из антизапорного теллурического контакта, захватываются ловушками E_{t2} . Проводимость пленок при этом остается чисто омической, благодаря присутствию равновесных дырок. По мере роста значения напряжения заполнение E_{t2} увеличивается все больше (дырочный квазиуровень Ферми все больше отходит от уровня E_{t2} ближе к валентной зоне). При этом также возрастает концентрация инжектированных свободных дырок в валентной зоне. Как только в последней концентрация инжектированных носителей становится больше концентрации равновесных дырок, ток начинает быстро возрастать с увеличением приложенного напряжения, т.е. происходит заполнение ловушек. Рост тока продолжается до тех пор, пока он не начинает ограничиваться захватом носителей на уровнях E_{t1} (при приближении дырочного квазиуровня Ферми к уровню E_{t1}). Этот участок называется ловушечным квадратичным участком, после которого ток с напряжением резко растет до безловушечного квадратичного участка. На основе полученных данных далее проводится полуколичественный анализ вольт-амперных характеристик исследованных структур [18,19].

Удельные сопротивления, концентрации и подвижности равновесных носителей исследованных образцов могут быть вычислены из омического участка ВАХ, исходя из теории ТОПЗ. Согласно теории ТОПЗ, подвижность носителей в идеальном изоляторе можно определять из

Таблица 1. Значения некоторых параметров в пленочных аморфных твердых растворах системы Se–S

Образец	ρ , Ом·см	ρ_0 , см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	$E_v - F_0$, эВ	$E_v - E_{t1}$, эВ	$E_v - E_{t2}$, эВ
Se	$3.85 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^{10} - 1.6 \cdot 10^{11}$	$10^{-4} - 0.9 \cdot 10^{-3}$	0.46–0.52	0.27	0.79–0.85
Se _{0.95} S _{0.05}	$5.2 \cdot 10^{13}$	$0.8 \cdot 10^7 - 0.7 \cdot 10^{11}$	$0.17 \cdot 10^{-5} - 0.15 \cdot 10^{-1}$	0.48–0.72	0.23	0.77–1.01
Se _{0.9} S _{0.1}	$4.08 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{10} - 1.7 \cdot 10^{12}$	$0.9 \cdot 10^{-6} - 0.13 \cdot 10^{-3}$	0.40–0.53	0.22	0.71–1.84
Se _{0.8} S _{0.2}	$4.85 \cdot 10^{13}$	$0.3 \cdot 10^{11} - 0.7 \cdot 10^{13}$	$0.17 \cdot 10^{-7} - 0.37 \cdot 10^{-5}$	0.36–0.50	0.21	0.63–0.77
Se _{0.7} S _{0.3}	$2.33 \cdot 10^{13}$	$3.8 \cdot 10^{10} - 2.4 \cdot 10^{12}$	$0.11 \cdot 10^{-6} - 0.07 \cdot 10^{-4}$	0.39–0.50	0.24	0.72–0.83
Se _{0.6} S _{0.4}	$3.61 \cdot 10^{13}$	$2.9 \cdot 10^9 - 1.3 \cdot 10^{12}$	$0.13 \cdot 10^{-6} - 0.6 \cdot 10^{-4}$	0.41–0.57	0.21	0.70–1.86
Se _{0.5} S _{0.5}	$3.73 \cdot 10^{12}$	$0.2 \cdot 10^{12} - 0.3 \cdot 10^{13}$	$0.53 \cdot 10^{-6} - 0.8 \cdot 10^{-5}$	0.38–0.45	0.22	0.74–1.81

Таблица 2. Значения некоторых параметров в пленочных аморфных твердых растворах системы Se–S

Образец	V_{fct} , В	I , А	V_{fct1} , В	I , А	p_{t02} , см ⁻³	θ
Se	7.33	$3 \cdot 10^{-6}$	3.73	$1.2 \cdot 10^{-8}$	$11.87 \cdot 10^{13}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
Se _{0.95} S _{0.05}	85.11	$4 \cdot 10^{-6}$	44.64	10^{-9}	$60.65 \cdot 10^{13}$	$1.15 \cdot 10^{-4}$
Se _{0.9} S _{0.1}	43.65	$5 \cdot 10^{-7}$	9.37	$2 \cdot 10^{-9}$	$24.58 \cdot 10^{13}$	$0.69 \cdot 10^{-2}$
Se _{0.8} S _{0.2}	97.72	$3.3 \cdot 10^{-8}$	58.98	$2 \cdot 10^{-9}$	$151.6 \cdot 10^{13}$	$0.46 \cdot 10^{-2}$
Se _{0.7} S _{0.3}	69.18	$1.14 \cdot 10^{-7}$	14.60	$7.5 \cdot 10^{-10}$	$15.5 \cdot 10^{13}$	$1.56 \cdot 10^{-2}$
Se _{0.6} S _{0.4}	112.20	$4.36 \cdot 10^{-7}$	30.00	$8.5 \cdot 10^{-10}$	$59.8 \cdot 10^{13}$	$0.22 \cdot 10^{-2}$
Se _{0.5} S _{0.5}	112.20	$1.55 \cdot 10^{-6}$	2.41	$8 \cdot 10^{-10}$	$4.62 \cdot 10^{13}$	$0.66 \cdot 10^{-1}$

„безловушечного квадратичного закона“ (БКЗ), который представляет собой ВАХ идеального изолятора:

$$J \approx \varepsilon \mu \frac{V^2}{L^3}, \quad (1)$$

где ε — статическая диэлектрическая проницаемость образца, μ — подвижность носителей, L — толщина пленки. Этот же закон является предельной формой ВАХ неидеального изолятора при достаточно высоких приложенных напряжениях, когда общее количество инжектированных электронов уже значительно превышает число первоначально незанятых электронных ловушек. Это дает возможность оценить по формуле (1) нижний предел подвижности, где $\varepsilon = 8.85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см, а $L = 3 \cdot 10^{-4}$ см. Затем найти ее величину по значению сопротивления (ρ), определенного из омической области, и концентрации равновесных свободных носителей (p_0) из $\rho = (e p_0 \mu)^{-1}$.

Верхний предел подвижности можно оценить из ловушечного квадратичного закона (ЛКЗ) тока от напряжения. Если концентрация свободных электронов удваивается вследствие инжекции, то выражение для концентрации неравновесных электронов, захваченных на мелких ловушках, принимает вид p_0/θ [18]. Соответствующие значения θ для различных составов приведены в табл. 2. Учитывая в формуле (1) эти значения θ , были получены верхние значения μ и p_0 для различных составов. Нижние и верхние значения подвижности и концентрации носителей тока для различных аморфных составов системы Se–S при комнатной температуре приведены в табл. 1.

Положение уровня Ферми $E_c - F_0$ в запрещенной зоне для исследованных образцов системы Se–S в условиях

равновесия можно определить (при известной величине концентрации свободных носителей) из выражения

$$p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_v - F_0}{kT}\right), \quad (2)$$

где N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне, kT — тепловая энергия. Полагая для оценок $N_v \approx 10^{19}$ см⁻³, для различных составов были вычислены значения $E_v - F_0$, которые также представлены в табл. 1.

По полученным данным можно определить и энергии ионизации, и концентрации ловушек. Согласно теории ТОПЗ, напряжение, при котором начинается участок полного заполнения ловушек с энергией E_{t2} (V_{fct1}), связано с концентрацией первоначально не занятых носителями ловушек (p_{t02}) соотношением

$$V_{\text{fct1}} = \frac{q p_{t02} L^2}{\varepsilon}. \quad (3)$$

При известных значениях для различных составов системы Se–S были определены значения V_{fct1} и p_{t02} (табл. 2). Как видно из табл. 1 и 2, $p_{t02} \gg p_0$.

Концентрация глубоких ловушек в аморфном селене $N_{t2} = 10^{20}$ см⁻³ [20], и по своей природе они представляют собой глубокие доноры [7]. Энергетическое положение уровня E_{t2} можно определить при известных величинах N_{t2} и F_0 из соотношения

$$p_{t02} \approx \frac{N_{t2}}{g_A} \exp\left(\frac{E_{t2} - F_0}{kT}\right), \quad (4)$$

где g_A — коэффициент спинового вырождения уровня E_{t2} . Полагая $N_{t2} = 10^{20}$ см⁻³ и $g_A = 2$, по формуле (4)

получим значения $E_v - E_{i2}$ для различных аморфных составов системы Se–S, которые представлены в табл. 1.

Энергетическое положение мелкого уровня E_{i1} можно оценить исходя из того, что на участке, где начинается ЛКЗ, квазиуровень Ферми для дырок F_{fct1} с точностью до kT совпадает с положением уровня E_{i1} , т. е.

$$E_v - E_{i1} \approx E_v - F_{\text{fct1}} = kT \ln \frac{N_v}{p_{\text{fct1}}}, \quad (5)$$

где p_{fct1} — концентрация свободных дырок, инжектированных в пленку при напряжении начала ЛКЗ (V_{fct1}). Последнее связано с концентрацией p_{fct1} соотношением, аналогичным формуле (3):

$$V_{\text{fct1}} = \frac{q p_{\text{fct1}} L^2}{\varepsilon}. \quad (6)$$

По значениям V_{fct1} для различных составов системы Se–S были вычислены значения p_{fct1} и $E_v - E_{i1}$ (табл. 1). Концентрацию центров с энергией E_{i1} (N_{i1}) можно определить, как в [18], из уравнения электронейтральности:

$$p_0 + N_{i2}^- = N_{i1}^+, \quad (7)$$

где N_{i2}^- и N_{i1}^+ — концентрации ионизованных доноров и акцепторов соответственно. В нашем случае $N_{i2}^- \approx N_{i1}^+$ и $p_0 \ll N_{i2}$, поэтому формула (7) может быть переписана следующем образом:

$$N_{i2} = \frac{N_{i1}}{1 + g_D \exp\left(\frac{F_0 - E_{i1}}{kT}\right)}, \quad (8)$$

из которой можно вычислить концентрацию акцепторов (поскольку величины F_0 , N_{i2} и N_{i1} уже заданы). Так как $E_{i1} - F_0 \gg kT$, то $N_{i1} \approx N_{i2} \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Этот результат происходит из-за того, что F_0 лежит между донорными и акцепторными уровнями. Здесь имеет место почти полная взаимная компенсация доноров и акцепторов, а концентрация свободных электронов в зоне проводимости пренебрежимо мала по сравнению с концентрациями ловушек.

Полученные данные можно объяснить по модели заряженных собственных дефектов в некристаллических полупроводниках [1–5]. Известно, что изменение в некристаллических полупроводниках координационного числа, типа атомов, окружающих данный атом, длины связей и валентных углов с изменением состава исследованных образцов приводит к изменению в них ближнего порядка. Это в свою очередь приводит к изменению их физических свойств. Некристаллические образцы системы Se–S состоят из замкнутых и линейных цепей атомов, соотношения между которыми изменяются в зависимости от состава образцов, что приводит к изменению характера в них ближнего порядка [21].

Как отмечено в [22], нельзя провести принципиальной границы между монокристаллическим, поликристаллическим и аморфным состояниями вещества. Наличие зонной структуры — запрещенной зоны и зоны проводимости — может быть выведено из факта существования

ближнего порядка атомов, и для такого вывода нет необходимости требовать периодического расположения атомов. Это сходство продемонстрировано на примере Se [23].

Отсутствие дальнего порядка в расположении атомов в некристаллических веществах приводит к возникновению большой плотности локализованных состояний в запрещенной зоне и малой по величине подвижности носителей тока. Дрейфовая подвижность, определенная в них, обычно не используется для определения проводимости, как это имеет место в случае кристаллических полупроводников.

О природе локализованных состояний существуют различные точки зрения. Происхождение их может быть связано как с размытием разрешенных зон, так и с дефектами типа D^+ и D^- [24,25], и с возможностью существования ненасыщенных связей, образующих нейтральные дефекты D^0 . Предполагается, что эти дефекты нестабильны и для них энергетически выгодна реакция $2D^0 \rightarrow D^+ + D^-$. В результате этого возникают заряженные дефекты вследствие перехода электрона с одной ненасыщенной связи на другую, при этом предполагается, что кулоновская энергия отталкивания компенсируется за счет изменения атомной конфигурации. Например, в селене при уходе электрона с ненасыщенной орбитали один из оставшихся трех электронов может перейти с несвязывающей орбитали на связывающую, с соответствующим понижением энергии. В этом случае состояние $D^+(C_3^+)$ имеет трехкоординированную конфигурацию в отличие от состояния $D^-(C_1^-)$, связанного с одним соседним атомом.

4. Заключение

В результате проведенных исследований вольт-амперных характеристик аморфных пленочных образцов системы $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) установлено, что перенос носителей заряда в исследованных образцах осуществляется по механизму токов монополярной инжекции, ограниченных пространственными зарядами при участии двух групп ловушек захвата: мелких (E_{i1}), соответствующих заряженным собственным дефектам C_1^- и обусловленных оборванными связями селена, а также глубоких (E_{i2}), соответствующих заряженным собственным дефектам C_3^+ . Показано, что изменение состава системы селен–сера сильно влияет как на механизм транспорта зарядов, так и на параметры ловушек — на их энергетические положения и концентрации.

Список литературы

- [1] P.W. Anderson. Phys. Rev. Lett., **37**, 953 (1975).
- [2] R.A. Street, N.F. Mott. Phys. Rev. Lett., **35**, 1293 (1975).
- [3] N.F. Mott, E.A. Davis, R.A. Street. Phil. Mag. B, **32**, 961 (1975).

- [4] M. Kastner, D. Adler, H. Fritzsche. Phys. Rev. Lett., **37**, 1504 (1976).
- [5] H. Fritzsche, M. Kastner. Phil. Mag. B, **37**, 285 (1978).
- [6] Н. Мотт, Э. Дэвис. *Электронные процессы в некристаллических веществах* (М., Мир, 1982).
- [7] *Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках*, под ред. К.Д. Цэндина (СПб., Наука, 1996).
- [8] А. Фельц. *Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела* (М., Мир, 1986).
- [9] Д.М. Чижиков, В.П. Счастливым. *Селен и селениды* (М., Наука, 1964).
- [10] С.Д. Барановский, Э.А. Лебедев. ФТП, **19**, 1035 (1985).
- [11] А. Меден, М. Шо. *Физика и применение аморфных полупроводников* (М., Мир, 1991).
- [12] K. Shimakawa, A. Kolobov. Adv. Phys., **44**, 537 (1995).
- [13] K.L. Bhatia, G. Partasarathy, E.S.P. Gopal. J. Non-Cryst. Sol., **69**, 189 (1985).
- [14] L.A. Wahab, M.B. El-Den, M.S. Youssef. Egypt. J. Sol., **23**, 71 (2000).
- [15] S.R. Ovshinsky. Phys. Rev. Lett., **21**, 1450 (1988).
- [16] L.A. Wahab. Proc. Second Int. Conf. (Science & Development & Environment) (Cairo, 1997) p. 215.
- [17] A.F. Maged, L.A. Wahab, I.A. El Kholy. J. Mater. Sci., **33**, 3331 (1998).
- [18] Д. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [19] П.А. Иванов, О.И. Коньков, Е.И. Теруков. ФТП, **34**, 617 (2000).
- [20] W.E. Spear. Proc. Phys. Soc., **76**, 826 (1960).
- [21] D. Jecu, J. Jaklovszky, A. Trutia et al. J. Non-Cryst. Sol., **90**, 319 (1987).
- [22] А. Роуз. *Основы теории фотопроводимости* (М., Мир, 1966).
- [23] M. Kastner. Phys. Rev. Lett., **26**, 355 (1972).
- [24] M. Kastner. Phys. Rev. Lett., **28**, 355 (1972).
- [25] R.A. Street, N.F. Mott. Phys. Rev. Lett., **35**, 1293 (1975).

Редактор Т.А. Полянская

Injection currents in amorphous solid solutions of system Se–S

N.Z. Djalilov, G.M. Damirov

Institute of Physics,
National Academy of Sciences of Azerbaijan,
AZ-1143 Baku, Azerbaijan

Abstract In this work studies of current–voltage characteristics of amorphous film samples of system $\text{Se}_{1-x}\text{S}_x$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) are presented. It has been shown that transfer of charge carriers follows the mechanism of monopolar injection currents limited by spatial charges involving two groups of capture traps: shallow (E_{t1}) corresponding to charges C_1^- defects caused by selenium bonds and deep (E_{t2}) also corresponding to charges C_3^+ defects. It was been also demonstrated that structure changes of the selenium–sulfur system effect the mechanism of charge transfer and the parameters of traps, their energy state and concentration.