

# Фотостимулированный перенос ионов в гетеропереходах на основе твердых электролитов, обладающих смешанной ионно-электронной (дырочной) проводимостью

© А.И. Стецун

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
03028 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 19 мая 2003 г.  
В окончательной редакции 26 августа 2003 г.)

Обоснована концепция фотостимулированного переноса ионов в гетеропереходах на основе твердых электролитов, которые имеют смешанную ионно-электронную (дырочную) проводимость. Обнаружение явления фотоосаждения металла в гетеропереходе с твердым электролитом со смешанной проводимостью экспериментально подтверждает эту концепцию. Рассмотрена возможность использования гетеропереходов на основе слоя твердого электролита со смешанной ионно-электронной (дырочной) проводимостью для оптической записи информации.

## 1. Введение

С момента разработки технологии и развития теории гетеропереходов они применяются для производства диодов, транзисторов, фотодиодов, солнечных элементов, светодиодов, полупроводниковых лазеров и т.д. [1–3]. Несмотря на такое широкое использование гетеропереходов, возможности их применения для оптической записи информации являются недостаточно изученными. Настоящая работа посвящена разработке и исследованию определенного типа гетеропереходов, предназначенного для оптической записи информации.

Известно [4,5], что одно из применений гетеропереходов основано на том, что при освещении гетероперехода генерируется фотоэдс. Генерация фотоэдс обусловлена тем, что возбужденные светом в обеих частях гетероперехода электрон-дырочные пары разделяются электрическим полем, которое существует в областях пространственного заряда гетероперехода. Величина фотоэдс может быть определена исходя из выражения [4]

$$V = \int \left( \frac{\Delta\sigma_n + \Delta\sigma_p}{\sigma} \right) \xi_0 dx - \int \left( \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma} \right) \left( \frac{d\chi}{dx} \right) dx - \int \left( \frac{\Delta\sigma_p}{\sigma} \right) \left( \frac{d\chi}{dx} + \frac{dE_g}{dx} \right) dx + kT \int \left[ \left( \frac{\Delta\sigma_p}{\sigma} \right) \frac{d}{dx} (\ln N_v) - \left( \frac{\Delta\sigma_n}{\sigma} \right) \frac{d}{dx} (\ln N_c) \right] dx, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — проводимость при освещении,  $\Delta\sigma$  — фотопроводимость,  $\chi$  — электронное сродство,  $N_c$  — плотность электронных состояний в зоне проводимости,  $N_v$  — плотность состояний в валентной зоне,  $\xi_0$  — напряженность электрического поля в гетеропереходе,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны.

Электрическое поле, которое создается разделенными электронами и дырками, имеет направление, противоположное полю области пространственного заряда гетероперехода. Напряженность фотоиндуцированного поля

можно определить как

$$E = \frac{V}{\Delta x}, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  — расстояние между разделенными гетеропереходом электронами и дырками. Такое поле при освещении гетероперехода распространяется как на область пространственного заряда гетероперехода, так и на квазинейтральную область.

Поэтому, если в одну из двух частей такого фотоэлектрического гетероперехода условно поместить заряженные частицы, отличные от электронов и дырок, — ионы определенного знака, которые обладали бы подвижностью, электрическое поле, возникающее при генерации фотоэдс, должно стимулировать перемещение ионов по толщине одной из частей гетероперехода. Таким образом, освещение гетероперехода, которое вызывает генерацию фотоэдс, стимулировало бы ионный массоперенос. Соответственно различие в распределении концентрации ионов по толщине одной из частей гетероперехода до и после его экспозиции могло бы быть использовано для оптической записи информации.

Подвижные заряды двух видов — ионы и электроны (либо дырки) — существуют в твердых электролитах со смешанной ионно-электронной (дырочной) проводимостью. Поэтому, если сформировать гетеропереход между обычным полупроводником с электронной (либо дырочной) проводимостью и твердым электролитом со смешанной проводимостью, при освещении которого генерировалась бы фотоэдс, можно было бы получить определенный тип гетероперехода, где имел бы место фотостимулированный перенос ионов по толщине одной из двух частей гетероперехода.

Граница раздела материалов с несовпадающими длинами связей обладает значительным числом дефектов, которыми являются ненасыщенные связи [3]. Такие связи действуют как центры захвата электронов и центры рекомбинации. Вследствие рекомбинационных процессов между электронами и ионами на границе раздела двух

**Таблица 1.** Характеристики электропроводности пленок  $As_2S_3$ , фотолегированных серебром до различных концентраций (температура 300 К [7])

$C_{Ag}, \text{at.}\%$	$\sigma_i, \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\sigma_p, 10^{-5} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\eta_i$
20	$7.6 \cdot 10^{-8}$	0.17	0.04
25	$8.2 \cdot 10^{-6}$	2.8	0.23
29	$3.5 \cdot 10^{-5}$	4.7	0.43
32	$3.0 \cdot 10^{-4}$	6.3	0.83

Примечание.  $C_{Ag}$  — концентрация серебра,  $\sigma_i$  — ионная проводимость,  $\sigma_p$  — дырочная проводимость,  $\eta_i$  — число переноса.

частей гетероперехода может происходить фотоосаждение химического элемента, обеспечивающего ионную проводимость в твердом электролите.

Для экспериментальной проверки возможности индуцирования освещением массопереноса ионов по толщине слоя твердого электролита со смешанной проводимостью в гетеропереходе исследовалось влияние освещения на гетеропереходы между полупроводниками типа  $A^2B^6$  и слоями стеклообразного  $As_2S_3$ , фотолегированного серебром до концентраций 2–32 at.%.

Выбор полупроводников типа  $A^2B^6$  в качестве составной части гетероперехода обусловлен тем, что такие материалы обеспечивают высокие значения фотоэдс [6].

Фотолегированные серебром слои  $As_2S_3$  являются твердым электролитом со смешанной ионно-дырочной проводимостью [7–9]. Метод фотолегирования позволяет изменять концентрацию металла в слое полупроводника в широких пределах и вследствие этого модифицировать значения ионной и дырочной проводимости (табл. 1). Это дает возможность существенно разнообразить условия экспериментальных исследований гетеропереходов с твердым электролитом.

Для гетеропереходов  $CdSe-As_2S_3Ag_x$  ( $x = 0.9-2.4$ ) экспериментально обнаружено явление фотостимулированного переноса ионов серебра и фотоосаждения серебра в гетеропереходе. Полученные экспериментальные результаты доказали возможность использования гетероперехода со смешанным ионно-электронным (дырочным) проводником для оптической записи информации.

## 2. Методика эксперимента

Основная задача настоящей работы заключалась в том, чтобы обосновать концепцию фотостимулированного переноса ионов и экспериментально установить наличие такого переноса ионов по толщине одной из частей гетероперехода на основе твердого электролита при его освещении.

Для того чтобы индуцировать фотостимулированные изменения в гетеропереходе, такие гетеропереходы экспонировались галогенной лампой КГ-220-500 при раз-

личных освещенностях. Во время экспонирования образец охлаждался воздушным потоком от вентилятора.

После экспонирования образцы исследовались с помощью оптического микроскопа Биолам. Распределение концентрации металла по толщине слоя твердого электролита изучалось с помощью Оже-анализатора JAMP-10S.

Гетеропереходы были получены методом термического напыления в вакууме. Для этого использовалась вакуумная установка ВУП-5. В процессе напыления слоев вакуум был не ниже  $10^{-3}$  Pa.

Фотолегированные серебром слои  $As_2S_3$  готовились по методике [10,11]. После того как был получен фотолегированный серебром слой  $As_2S_3$ , нанесенный на кварцевую либо кремниевую подложку, сверху на него термически напылялся слой CdSe.

Оптические спектры отражения и пропускания до и после экспонирования гетеропереходов исследовались на спектрофотометре КСВУ-23 в спектральном диапазоне 200–1200 nm.

Значения фотоэдс измерялись на вольтметре В7-45. Внутреннее сопротивление вольтметра  $10^{16} \Omega$ .

## 3. Экспериментальные результаты

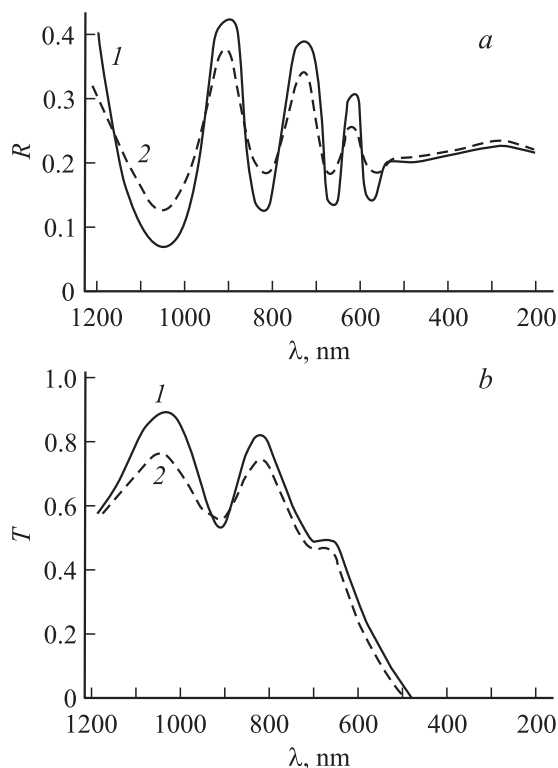
В настоящей работе исследовались гетеропереходы с толщинами слоев CdSe 200–500 nm; толщины слоев  $As_2S_3$ , фотолегированных серебром, находились в пределах 400–500 nm.

Первый этап исследований был посвящен неэкспонированным гетеропереходам CdSe–фотолегированный серебром  $As_2S_3$ . Вначале такие незасвеченные гетеропереходы исследовались с помощью оптического микроскопа. Никаких неоднородностей, осадков или кластеров в структуре гетероперехода обнаружено не было.

Незасвеченные гетеропереходы также подвергались химической обработке. Пленка CdSe стравливалась химически в смеси  $HNO_3$  и  $HCl$ . Оставшаяся пленка  $As_2S_3$ , фотолегированная серебром, исследовалась с помощью электронного микроскопа, который входил в состав Оже-анализатора. Такой способ анализа также показал отсутствие осадков и кластеров в фотолегированном слое. С помощью Оже-анализа установлено, что концентрация серебра в приповерхностной области пленки  $As_2S_3$ , фотолегированной серебром до концентрации 25 at.%, не отличалась от этой величины более чем на 1 at.%.

На следующем этапе исследований гетеропереходы подвергались освещению.

Если гетеропереходы CdSe–фотолегированный серебром  $As_2S_3$  освещать со стороны фотолегированного слоя галогенной лампой КГ-220-500 при освещенности  $8 \cdot 10^4$  lux в течение 2 h, то при концентрации серебра в фотолегированном слое 15–32 at.% (что соответствует химическому составу слоя  $As_2S_3$  при  $x = 0.9-2.4$ ) освещение вызывает образование в гетеропереходе двух



**Рис. 1.** Спектры отражения  $R$  (а) и пропускания  $T$  (б) гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  до (1) и после (2) экспонирования.

типов осаджений серебра. Осадки образуются вблизи границы раздела слоев в фотолегированном слое. Характерные размеры осаджений находились в пределах  $0.2-0.5 \mu\text{m}$  для меньших и  $2-5 \mu\text{m}$  для больших осаджений.

Результаты Оже-анализа показали, что освещение гетеропереходов приводит к тому, что концентрация ионов серебра возрастает вблизи границы раздела слоев. Для этого гетеропереход  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3$ , фотолегированный серебром до концентрации 25 at.% (химический состав слоя соответствует формуле  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$ ), освещался галогенной лампой при освещенности  $8 \cdot 10^4 \text{ lux}$  в камере Оже-анализатора в течение 20 min. Затем пленка  $\text{CdSe}$  стравливалась ионным пучком аргона в течение 20 min, при этом экспонирование образца продолжалось при той же освещенности. Вследствие экспонирования в таких условиях в приповерхностной области фотолегированного слоя образовывались осаджения размером  $0.2-0.3 \mu\text{m}$ . В областях, свободных от осаджений, концентрация серебра в приповерхностной области фотолегированного слоя возросла на 5 at.% по сравнению с концентрацией серебра в фотолегированном слое.

Такая же процедура экспонирования и травления гетероперехода была выполнена для гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  при освещенности экспонирования  $2 \cdot 10^4 \text{ lux}$ . В этом случае образования осаджений не наблюдалось, а концентрация серебра в приповерхностной области слоя  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  увеличилась на 3 at.%.

Размеры фотоосаджений, которые образуются при экспонировании гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$ , зависят от освещенности и длительности экспонирования. Если гетеропереход экспонировать при освещенности  $8 \cdot 10^4 \text{ lux}$  в течение 2 h, то реализуется насыщение фотоосаджения серебра, когда осаджения больших размеров имеют высоту, равную толщине фотолегированного слоя.

Аналогичные результаты были получены при освещении гетеропереходов  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_x$  ( $x = 0.9-2.4$ ) со стороны слоя  $\text{CdSe}$ .

В исследуемых гетеропереходах регистрировалась темновая эдс с положительным потенциалом на слое  $\text{CdSe}$ . При освещении гетероперехода была обнаружена фотоэдс с отрицательным потенциалом на слое  $\text{CdSe}$ .

Так, в гетеропереходе  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$ , где толщина слоя  $\text{CdSe}$  равна 200 nm, а толщина слоя  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  составляет 430 nm, регистрировалась темновая эдс 105 mV с положительным потенциалом на слое  $\text{CdSe}$ . При освещенности  $8 \cdot 10^4 \text{ lux}$  для этого гетероперехода фиксировалась фотоэдс 90 mV с отрицательным потенциалом на слое  $\text{CdSe}$ . Электрическое поле, которое возникает в этом случае в слое твердого электролита при генерации фотоэдс такого знака, имеет направление, стимулирующее движение положительных ионов серебра к границе раздела слоев.

Спектры отражения и пропускания исходной и экспонированной гетероструктуры  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  приведены на рис. 1. В результате экспонирования регистрируется уменьшение величины интерференционных осцилляций, что свидетельствует об увеличении поглощения фотолегированным слоем. Известно [12], что увеличение концентрации серебра в фотолегированном слое  $\text{As}_2\text{S}_3$  приводит к сдвигу края поглощения в длинноволновую

**Таблица 2.** Зависимость светочувствительности гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  от длины световой волны

$\lambda, \text{ nm}$	$S, 10^{-9} \text{ lux}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
1200	0.30
1180	0.35
1140	0.20
1100	1.10
1060	1.20
1020	0.30
980	0.10
940	0.14
900	0.20
860	0.21
820	0.70
780	0.10
740	0.30
700	0.20
660	0.70
620	0.40
580	0.50
540	0.01

сторону и увеличению поглощения в слое. Поэтому уменьшение величины интерференционных осцилляций связано с локальным увеличением концентрации серебра в определенных интервалах толщин фотолегированного слоя.

На основе спектральной зависимости отражения была рассчитана светочувствительность гетероструктуры  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$ . Для этого использовалось определение светочувствительности как величины, обратной экспозиции, которая вызывает относительное изменение отражения  $R$ ,

$$S = \frac{A}{Et}, \quad (3)$$

где  $E$  — освещенность,  $t$  — время экспонирования,

$$A = \frac{\Delta R}{R}. \quad (4)$$

Значения светочувствительности двухслойной структуры  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  приведены в табл. 2.

## 4. Обсуждение

Увеличение концентрации ионов серебра вблизи границы раздела слоев, из которых состоит гетеропереход, при экспонировании гетероперехода и образование фотоосаждений на границе раздела слоев показывают, что освещение гетероперехода вызывает фотостимулированный перенос ионов к границе раздела слоев. Такой массоперенос индуцируется электрическим полем, которое возникает при генерации фотоэдс. Таким образом, полученные экспериментальные результаты подтверждают концепцию фотостимулированного переноса ионов в гетеропереходе с твердым электролитом, выдвинутую при постановке задачи настоящей работы.

Фотостимулированные процессы, которые имеют место в гетеропереходах с твердым электролитом, обладающим смешанной ионно-электронной (дырочной) проводимостью, могут быть объяснены с учетом конкретной зонной диаграммы гетероперехода. Для этого рассмотрим, как образуется гетеропереход между слоями  $\text{CdSe}$  и  $\text{As}_2\text{S}_3$ , фотолегированного  $\text{Ag}$  до концентрации 25 ат.%. Величина сродства к электрону для  $\text{As}_2\text{S}_3$ , легированного серебром, превышает сродство к электрону для  $\text{CdSe}$  на 0.3 eV [13]. Поэтому, когда при термическом напылении  $\text{CdSe}$  наносится на слой  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$ , электроны из  $\text{CdSe}$  диффундируют в этот слой и рекомбинируют в нем с дырками. За счет этих процессов в слое  $\text{CdSe}$  образуется положительно заряженная область пространственного заряда, а в слое  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  — отрицательно заряженная область пространственного заряда.

Формирование областей пространственного заряда в гетеропереходе с твердым электролитом, обладающим смешанной проводимостью, приводит к двум конкурирующим процессам ионной миграции.

Во-первых, ионы, находящиеся в области пространственного заряда твердого электролита, будут выталкиваться за пределы этой области электрическим полем,

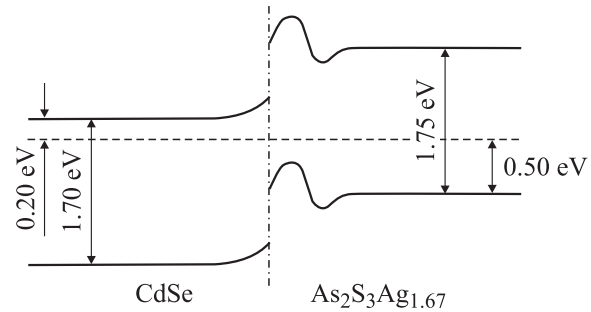


Рис. 2. Зонная диаграмма гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$ . Параметры материалов взяты из работ [6,10].

которое образуют между собой области пространственного заряда.

Во-вторых, процесс ионной миграции может возникнуть из-за взаимодействия зарядов, образующих положительную и отрицательную области пространственного заряда гетероперехода, с положительными ионами, расположенными в глубине слоя твердого электролита. Если распределение зарядов в положительно и отрицательно заряженных областях пространственных зарядов гетероперехода будет создавать поле диполя на расстояниях, значительно превышающих их размеры, положительные ионы должны притягиваться к отрицательно заряженной области обеднения гетероперехода.

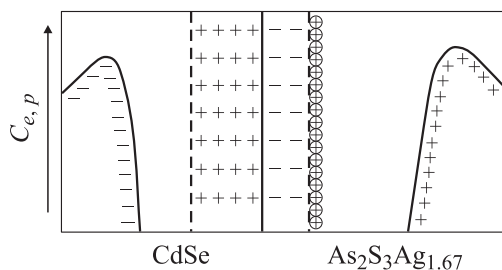
В результате двух процессов ионной миграции после области пространственного заряда твердого электролита будет образовываться плотный слой ионов. Существование такого плотного ионного слоя является характерным для границ раздела твердого электролита с другими материалами, в частности, в двойном электрическом слое [14].

Процессы ионной миграции продолжают в гетеропереходе с твердым электролитом до тех пор, пока сумма сил, действующих на каждый ион со стороны областей пространственного заряда и других частиц, не станет равной нулю.

Полученная таким образом зонная диаграмма гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  изображена на рис. 2. При построении этой диаграммы не учитывались процессы ионной миграции из глубины слоя твердого электролита к области пространственного заряда, так как напряженность поля пространственного диполя значительно слабее напряженности поля внутри области пространственного заряда твердого электролита.

Приведенная выше зонная диаграмма подобна зонной диаграмме плавного гетероперехода [15].

При освещении гетеропереходов  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  генерируются электрон-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем в областях пространственного заряда гетероперехода. Потенциальный барьер со стороны слоя  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{1.67}$  может преодолеваться электронами путем инжекции; инжекции с предварительной термализацией, а также туннелирования. Результаты исследований гетероперехода  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_{2.4}$  [16] пока-



**Рис. 3.** Схема расположения областей пространственного заряда в гетеропереходе CdSe–As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>Ag<sub>1.67</sub> и распределения концентрации разделенных полем гетероперехода фотовозбужденных электронов и дырок по толщине гетероперехода.

зывают, что наиболее важным механизмом преодоления потенциального барьера электронами является инжекция. Вследствие этих процессов электроны собираются в квазинейтральной области слоя CdSe, а дырки — в квазинейтральной области фотолегированного слоя.

Схема расположения областей пространственного заряда в гетеропереходе CdSe–As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>Ag<sub>1.67</sub> приведена на рис. 3. На этом же рисунке схематично показано распределение концентрации фотовозбужденных электронов и дырок, которые разделены электрическим полем гетероперехода. Форма распределения фотовозбужденных электронов и дырок приведена в соответствии с данными работы [3].

При освещении гетероперехода электрическое поле, которое образуется между разделенными полем гетероперехода фотовозбужденными электронами и дырками (рис. 3), действует на положительные ионы Ag<sup>+</sup> так, что при этом стимулируется массоперенос ионов к границе раздела слоев. Такое поле действует как на квазинейтральную область слоя твердого электролита, так и на область пространственного заряда.

Вследствие пространственного распределения поля, образованного фотовозбужденными носителями, и поля гетероперехода наиболее интенсивный массоперенос ионов происходит из квазинейтральной области твердого электролита к области его обеднения. Данный факт обусловлен тем, что в квазинейтральной области напряженность поля является высокой и направлена к границе раздела слоев, а в области пространственного заряда напряженность поля гетероперехода имеет противоположное направление (против поля разделенных электрон-дырочных пар).

После массопереноса ионов из квазинейтральной области к области пространственного заряда ионы серебра диффундируют в область пространственного заряда твердого электролита к границе раздела слоев. Такая диффузия становится возможной после освещения гетероперехода, поскольку поле разделенных электрон-дырочных пар уменьшает напряженность поля гетероперехода и в предельном случае при высоких освещенностях может обеспечить выравнивание зон гетероперехода. Кроме того, ионы серебра захватываются электронами,

которые движутся под действием поля гетероперехода на сторону CdSe (эффект „электронного ветра“ [17]).

Граница раздела CdSe и As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>Ag<sub>1.67</sub> является границей раздела поликристаллического и аморфного материала с разными длинами связей. Поэтому на ней существует значительное число дефектов — оборванных связей. Известно, что такие дефекты могут служить центрами захвата электронов и рекомбинации [2,3]. Поэтому процесс фотоосаждения серебра происходит вследствие рекомбинации электрона и иона на границе раздела. Последующий рост осаждения происходит либо за счет повторения этого же процесса — захвата электрона оборванной связью и рекомбинации другого иона с электроном с последующим объединением двух ионов, либо за счет захвата электрона при осаждении серебра рекомбинации следующего иона с этим электроном. Многократное повторение таких процессов приводит к росту осадений.

Теоретический анализ фотостимулированных процессов в гетеропереходах на основе смешанных ионно-электронных (дырочных) проводников и анализ полученных экспериментальных результатов показывают, что в зависимости от условий освещенности гетероперехода с твердым электролитом возможны два случая фотостимулированного переноса ионов: с последующим фотоосаждением химического элемента, обеспечивающего ионную проводимость, и без него.

Второй случай реализуется при более слабых освещенностях гетероперехода, когда электрическое поле, обусловленное генерацией фотоэдс, не способно обеспечить массоперенос ионов в область пространственного заряда твердого электролита к границе раздела слоев.

Проведенные в настоящей работе исследования позволяют предложить новый способ создания среды для оптической записи информации. Такая среда формируется как двухслойная или многослойная тонкопленочная структура, где между слоями твердого электролита со смешанной проводимостью и других материалов с электронной либо дырочной проводимостью образуются гетеропереходы, обладающие фотоэдс. При экспонировании гетероструктуры фотоактивным светом имеет место фотостимулированный перенос ионов по толщине слоя твердого электролита. В зависимости от освещенности гетероперехода и свойств материалов, которые образуют гетеропереход, возможно также фотоосаждение химического элемента, обеспечивающего ионную проводимость в твердом электролите. Запись информации в такой среде осуществляется за счет того, что в освещенных местах сигнал отражения (либо пропускания) отличается от сигнала для неэкспонированных участков среды.

Принцип формирования среды охватывает многочисленные комбинации твердых электролитов, обладающих смешанной проводимостью, с полупроводниками, диэлектриками, металлами. Поэтому можно ожидать, что физические свойства гетероструктур на основе твердых электролитов со смешанной проводимостью могут зна-

чительно отличаться друг от друга. При этом существенную роль играет тот факт, что возможно образование гетеропереходов с зонными диаграммами разных типов. Кроме того, физические свойства твердых электролитов различаются как по типу, так и по величине проводимости. Так, если характерные значения проводимости для стекла  $\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_x$  ( $x = 0.9-2.4$ ) находятся в пределах  $7.6 \cdot 10^{-8} - 3.08 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  [7], то ионная проводимость стекла  $(\text{Ag}_2\text{GeS}_3)_{48}(\text{AgI})_{52}$  имеет значение  $6 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  [18].

Кристаллы  $\text{Cu}_4\text{RbCl}_3\text{I}_2$  и  $\text{Ag}_4\text{RbI}_5$  имеют значения ионной проводимости, существенно большие ( $0.5$  и  $0.3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  соответственно) [19].

Если путем легирования примесью либо с помощью других методик обеспечить электронную (дырочную) составляющую проводимости для этих материалов и создать на их основе гетеропереходы, обладающие фотоэдс, то можно ожидать, что время записи информации будет уменьшено на несколько порядков по сравнению с характерными для гетероструктур  $\text{CdSe}-\text{As}_2\text{S}_3\text{Ag}_x$  ( $x = 0.9-2.4$ ).

## 5. Выводы

Необходимым условием для фотостимулированного массопереноса ионов в гетеропереходе с твердым электролитом, который имеет смешанную ионно-электронную (дырочную) проводимость, является генерация фотоэдс.

В зависимости от условий освещенности гетероперехода и свойств материалов, которые образуют гетеропереход, возможны два случая фотостимулированного переноса ионов.

1) Фотостимулированный перенос ионов с последующим фотоосаждением химического элемента, обеспечивающего ионную проводимость.

2) Фотостимулированный перенос ионов без фотоосаждения.

Анализ фотостимулированных процессов, которые могут происходить в гетеропереходах на основе твердых электролитов со смешанной проводимостью, показывает, что в зависимости от вида зонной диаграммы гетероперехода и типа проводимости материалов, которые образуют гетеропереход, возможны два направления фотостимулированного переноса ионов. Такой перенос может происходить из глубины слоя твердого электролита к границе раздела слоев либо в противоположном направлении — от границы раздела слоев к поверхности слоя твердого электролита.

## Список литературы

- [1] А.Г. Милнс, Д.Л. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. Академик Пресс, Нью-Йорк-Лондон (1975). С. 146.
- [2] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурухит. Полупроводниковые гетеропереходы. Сов. радио, М. (1979). С. 227.
- [3] А. Фаренбрух, Р. Бьюб. Солнечные элементы. Энергоатомиздат, М. (1987). 278 с.
- [4] Current Topic in Photovoltaic / Ed. T.G. Coutts, J.D. Meakin. Academic Press, London (1972). P. 25.
- [5] A. Van Der Ziel. Solid State Physical Electronics. Englewood Cliffs, Prentice-Hall (1957). P. 284.
- [6] К.Л. Чопра, С.Р. Дас. Тонкопленочные солнечные элементы. Мир, М. (1986). 440 с.
- [7] В.А. Данько, И.З. Индутный, В.И. Минько. ФХС **18**, 128 (1992).
- [8] И.З. Индутный. Журн. науч. и прикл. фотографии **39**, 65 (1994).
- [9] K. Tanaka. J. Non-Cryst. Sol. **137&138**, 1021 (1991).
- [10] И.З. Индутный, М.Т. Костышин, О.П. Косарум, В.И. Минько, Е.В. Михайловская, П.Ф. Романенко. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл-полупроводник. Наук. думка, Киев (1992). 240 с.
- [11] A.I. Stetsun, I.Z. Indutnyi, V.G. Kravets. J. Non-Cryst. Sol. **202**, 113 (1996).
- [12] И.З. Индутный, А.И. Стецун, М.В. Сопинский, В.Д. Нечипорук. Оптоэлектроника и полупроводниковая техника **30**, 42 (1995).
- [13] В.С. Фоменко. Эмиссионные свойства материалов. Наук. думка, Киев (1981). С. 184.
- [14] В.М. Арутюнян. УФН **158**, 255 (1989).
- [15] W.G. Oldham, A.G. Milnes. Solid State Electron. **6**, 121 (1963).
- [16] А.И. Стецун. ФТП **37**, 1197 (2003).
- [17] В.Б. Фикс. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках. Наука, М. (1983). С. 108-123.
- [18] A.Feltz. J. Non-Cryst. Sol. **90**, 545 (1987).
- [19] Ю.Я. Гуревич. Твердые электролиты. Наука, М. (1986). 172 с.