

ИНВЕРСИЯ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ СЛОЯ СЕЛЕНИДА ЦИНКА В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—(Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te)}_{1-y}\text{(In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$

А. П. Беляев, В. П. Рубец, Х. А. Тошходжаев, И. П. Калинин

Санкт-Петербургский технологический институт им. Ленсовета, 191119, Санкт-Петербург, Россия
(Получено 28.05.1992. Принято к печати 8.10.1992)

Гетероструктура $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—(Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te)}_{1-y}\text{(In}_2\text{Te}_3)_y$ в настоящее время нашла широкое применение в качестве фоточувствительных слоев в приборах с зарядовой связью и мишеней передающих телевизионных трубок [1, 2]. Однако детальные механизмы токопереноса в указанной ГС до сих пор остаются не до конца выясненными.

В связи с этим в настоящей работе исследовались гетероструктуры (ГС), выращенные на стеклянной подложке путем послойного термического напыления слоев оксида индия, селенида цинка, твердого раствора $(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te)}_{1-y}\text{(In}_2\text{Te}_3)_y$ и индия.

Толщина слоя оксида индия составляла сотые доли микрона. Его кристаллическая структура была поликристаллической. Удельное сопротивление составляло величину 10^{-3} Ом·см.

Слой селенида цинка имел поликристаллическую структуру с ориентацией кристаллов плоскостью (111) параллельно поверхности подложки. Разориентация кристаллитов относительно друг друга составляла угол в $3\div 5^\circ$. Толщина слоя ZnSe не превышала десятой доли микрона.

Слой твердого раствора имел поликристаллическую структуру, ориентированную плоскостью (220) параллельно поверхности подложки. Угол разориентации кристаллитов составлял значения $\sim (3\div 5)^\circ$. Толщина слоя ТР составляла $\sim (2.5\div 3.0)$ мкм.

Для определения типа проводимости отдельных слоев ГС специальные образцы, содержащие только один исследуемый слой,готавливались на стеклянной подложке в условиях, максимально приближенных к условиям, в которых этот слой выращивался при изготовлении полной ГС. Результаты исследования термоэдс, в приготовленных таким образом образцах, показали, что слой оксида индия

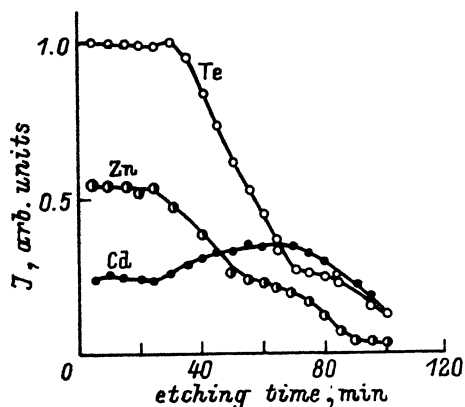


Рис. 1. Оже-спектр слоя твердого раствора $(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te)}_{1-y}\text{(In}_2\text{Te}_3)_y$ (интенсивность оже-сигнала не нормирована).

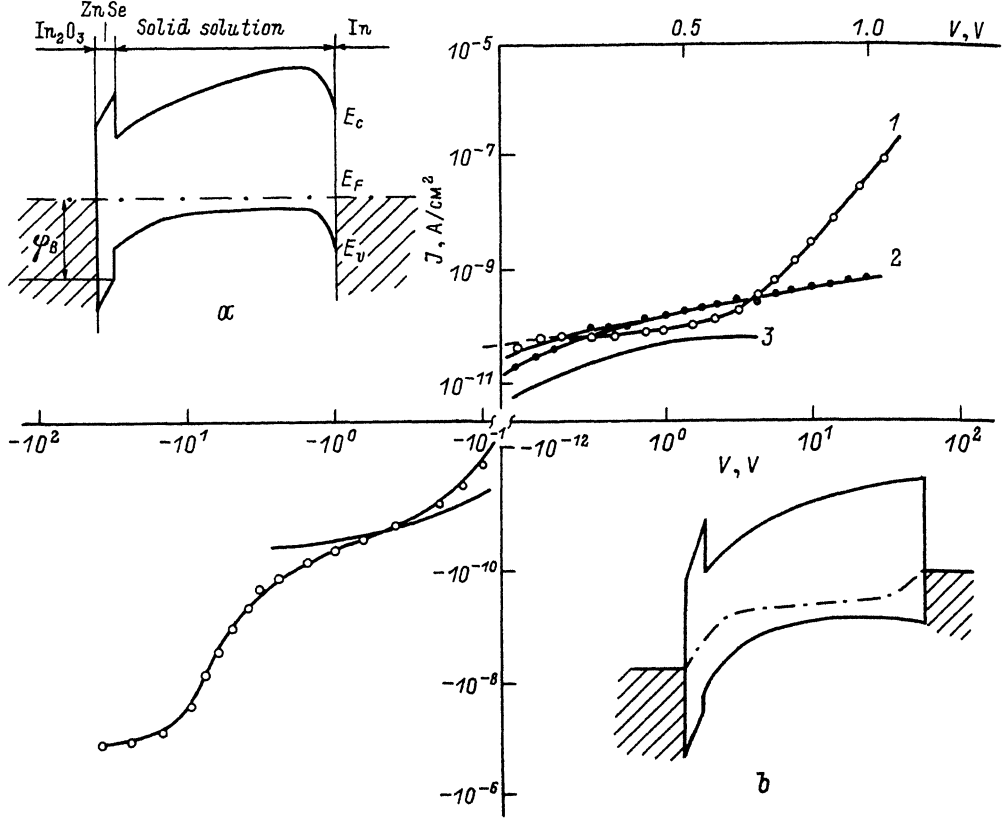


Рис. 2. Темновая ВАХ (1) и предполагаемая энергетическая диаграмма в равновесии (а) и под действием внешнего смещения (б) гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$ и темновая ВАХ гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—Ag}$ (2, катод — оксид индия, шкала токов вверх). Кривая 3 соответствует расчетной зависимости (1).

и селенида цинка обладали электронной проводимостью, а слой твердого раствора — дырочной.

Перед нанесением на ГС слоя индия, образцы отжигались в вакууме 10^{-3} Па при температуре 550°C в течение 5 минут. В приготовленных указанным образом ГС измерялись оже-спектр, темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ВАХ при облучении в 240 лк со стороны слоя ZnSe через светофильтр КС-13 от источника типа А. Измерения проводились при комнатной температуре в вакууме 10^{-3} Па. Основные результаты исследования представлены на рис. 1—3.

Рис. 1 демонстрирует оже-спектр слоя твердого раствора ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$. Как можно видеть из рисунка, состав слоя изменяется с толщиной. Вблизи слоя селенида цинка твердый раствор обогащен теллуридом кадмия, а вблизи поверхности — теллуридом цинка.

На рис. 2 (кривая 1) приведена типичная темновая ВАХ ГС. Она имеет вид, характерный для устройств с двойным обеднением (см. кривую 3), теоретически описываемый выражением [3]

$$J = \frac{2J_{s1}J_{s2} \operatorname{sh}(eV/2nkT)}{J_{s1} \exp(eV/2nkT) + J_{s2} \exp(-eV/2nkT)}, \quad (1)$$

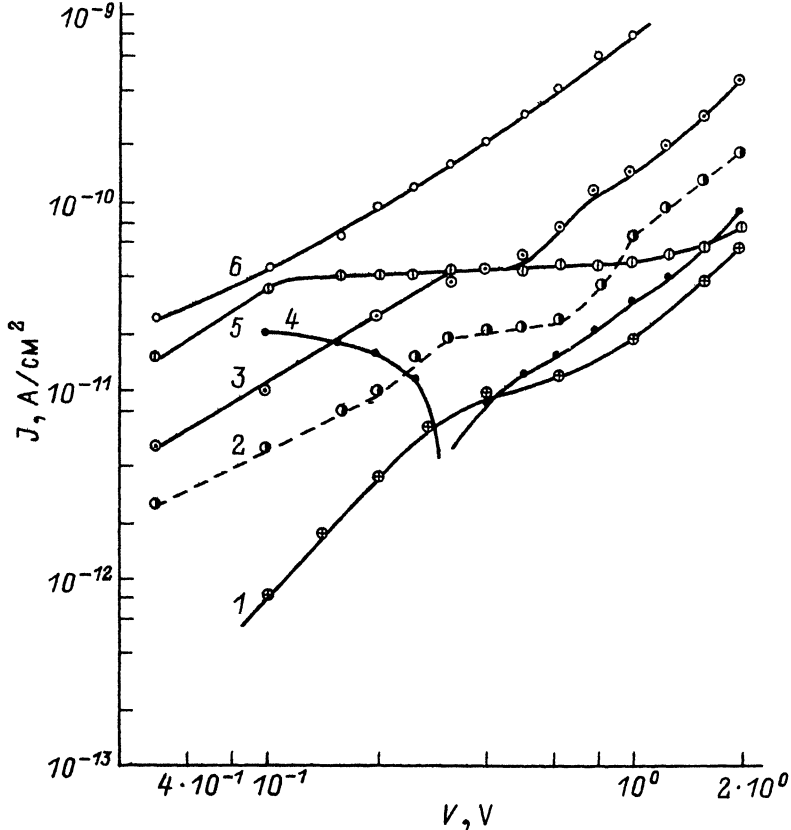


Рис. 3. ВАХ гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{O}_3)\text{—In}$ (1, 4—6) и гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$ (2, 3), снятые в темноте (1—3, 5) и под действием длинноволнового света (4, 6), при положительной полярности источника напряжения на слое оксида индия (2, 5, 6) и на слое индия (1, 3, 4).

где введен характерный параметр неидеальности n ; J_{s1} , J_{s2} — плотности токов насыщения; V — внешнее смещение; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; e — заряд электрона.

На рис. 3 показано действие длинноволнового света, для которого ZnSe прозрачен, на стационарную проводимость ГС. Из рисунка можно видеть, что освещенность увеличивает почти на порядок ток положительной ветви ВАХ и слабо изменяет ток отрицательной ветви. (В настоящей работе принято считать положительным состояние, при котором роль анода выполняет слой оксида индия).

Для оценки влияния индиевого электрода на ВАХ проводились измерения темновых токов в ГС с электродом из серебряной пасты. Измерения показали, что замена индиевого электрода на серебряный практически не влияет на положительную ветвь ВАХ и существенно изменяет отрицательную ветвь. В последнем случае, как можно видеть из рис. 1 (кривая 2), $J \sim \exp(eV/nkT)$.

Экспериментальные результаты, представленные выше, позволяют рассматривать ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$ как систему со сложным характером изменения зон, содержащую обедненные слои, образующие два встречно включенных диода типа «шотткинских». Первый обедненный слой, ограничивающий ток положительной ветви ВАХ, очевидно, расположен в слое твердого раствора вблизи границы с селенидом цинка. Об этом свидетельствует

значительное увеличение тока соответствующего направления при облучении образца длинноволновым светом ($\lambda > 0.6$ мкм). Для такого света селенид цинка прозрачен. Слой твердого раствора относится к варизонным материалам. Минимальная ширина запрещенной зоны, как следует из оже-спектра, имеет место вблизи границы с ZnSe. Следовательно, именно там имеет место наибольшее поглощение света, приводящее к сильному изменению проводимости ГС.

Второй обедненный слой, формирующий область насыщения отрицательной ветви ВАХ, очевидно, находится в широкозонной части твердого раствора. На это указывает слабое влияние длинноволнового света на проводимость при такой полярности включения образца (рис. 3, кривая 4). Можно полагать, что этот обедненный слой является результатом контакта слоя твердого раствора с индием. Предположение согласуется с запирающим действием барьера при минусе источника внешнего напряжения на индиевом электроде и экспериментальным фактом об изменении отрицательной ветви ВАХ при измерениях с серебряным электродом.

Для уточнения характера барьеров сравним темновые токи в ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$ и $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—(Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te)}_{1-y}\text{(In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$. Как можно видеть из рис. 3, внесение в ГС слоя твердого раствора увеличивало ее проводимость для положительного направления тока (ср. кривые 2, 4) и несколько уменьшало для отрицательного (ср. кривые 3, 1). Очевидно, возрастание проводимости является результатом образования в селениде цинка обогащенного слоя. Примем во внимание, во-первых, что слой ZnSe является высокоомным полупроводником, а значит уровень Ферми находится вблизи середины запрещенной зоны. Во-вторых, что слой селенида цинка с электронной проводимостью контактирует со слоем твердого раствора с дырочным типом проводимости. В-третьих, результаты [4], где показано, что проводимость ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—In}$ с субмикронным слоем селенида цинка определяется концентрацией электронов вблизи слоя оксида индия, обусловленной соотношением работ выхода из материалов граничных слоев. Тогда придем к выводу, что обогащенный слой мог образоваться только в результате инверсии типа проводимости в слое ZnSe. Вывод не противоречит экспериментальным данным об уменьшении проводимости ГС для отрицательной полярности включения, после внесения в нее слоя ТР. Уменьшение объясняется возникновением барьера Шоттки между дырочным полупроводником и индиевым электродом. Для этой полярности внешнего напряжения барьер оказывается включенным в запорном направлении.

Полученные выше результаты позволяют составить энергетическую диаграмму ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—(Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te)}_{1-y}\text{(In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$, схема которой показана на рис. 2. Левая часть ГС, с учетом данных о свойствах субмикронного слоя селенида цинка [4], может, согласно [5], рассматриваться как барьер типа Шоттки с промежуточным слоем, изменяющим высоту приэлектродного барьера. Прямая ветвь ВАХ такого барьера описывается выражением [5]

$$J = J_s \exp(eV/nkT), \quad (2)$$

$$J_s = A^{**} T^2 \exp(-e\varphi_B/kT), \quad (3)$$

позволяющим в результате линейной экстраполяции характеристики в координатах $\lg J—V$ к $V=0$ найти плотность тока насыщения J_s . Здесь φ_B — высота приэлектронного барьера; A^{**} — эффективная постоянная Ричардсона. Как следует из энергетической диаграммы, экспериментально прямая ветвь такого барьера может быть получена при использовании в ГС вместо индиевого электрода омического контакта, когда к слою оксида индия прикладывается отрицательный полюс внешнего источника напряжения. В качестве омического контакта нами применялся серебряный электрод. Результаты измерений отражает кривая 2 на рис. 3. Из рисунка можно видеть хорошее совпадение токов насыщения следу-

ющих из экспериментальных измерений с индиевым электродом ($J_s = 6.28 \cdot 10^{-11}$ А/см²) и экстраполяции ВАХ, полученной с серебряным электродом ($J_s = 4.2 \cdot 10^{-11}$ А/см²).¹ Значение тока насыщения позволяют из формулы (3) оценить высоту барьера φ_B . Для исследованной ГС оценки дают величину ~ 0.95 эВ при $A^{**} = = 30$ А/см² · К².²

Согласно (2), тангенс угла наклона характеристики $\lg J = f(V)$ позволяет оценить характерный параметр неидеальности n . Для рассматриваемой системы он оказывается равным 19. Столь высокое значение параметра, очевидно, связано с влиянием высокоомного слоя твердого раствора. На рис. 2 (кривая 3) показана расчетная ВАХ, соответствующая выражению (1) при характерном параметре неидеальности, равном 19. Рисунок демонстрирует значительное расхождение этой характеристики с экспериментом, которое, по-видимому, обусловлено тем, что параметр неидеальности, равный 19, был получен нами при измерениях с барьером, включенном в прямом направлении, когда сильно влияние высокоомной базы, а экспериментальная ВАХ соответствует условиям запорного включения барьеров, когда влияние высокоомного слоя твердого раствора не столь существенно. Высказанное предположение подтверждается расчетами по формуле (1) при характерном параметре неидеальности, равном 2, которые дают для положительной ветви ВАХ почти полное совпадение с экспериментом (вследствие совпадения такая расчетная кривая не нанесена на рис. 2).

Справедливость предполагаемой энергетической диаграммы ГС, кроме всего вышесказанного, подтверждается высокой стабильностью тока насыщения положительной ветви ВАХ от внешнего напряжения. В рамках предлагаемой модели она объясняется тем, что под действием внешнего напряжения происходит изменение степени инверсии слоя селенида цинка, а значит происходит уменьшение части напряжения, падающей на этом слое (см. рис. 2, б), что в свою очередь стабилизирует напряженность электрического поля в слое селенида цинка. В то же время известно, что изменение напряженности поля в промежуточном слое барьера является основной причиной возрастания тока насыщения с ростом внешнего смещения [5]. Поскольку в случае ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$ достигается стабилизация напряженности поля в слое ZnSe, то экспериментально наблюдается слабая зависимость тока насыщения от внешнего напряжения.

В заключение выскажем предположение о причине резкого возрастания тока, имеющего место в завершающей ВАХ области напряжений. Очевидно, в этом случае происходит пробой рассмотренных барьеров, а так как он носит обратимый характер, то можно полагать наиболее вероятным туннельный характер этого пробоя.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Темновой ток гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$ для положительной полярности внешнего напряжения определяется сложным гетеропереходом между слоями оксида индия и твердого раствора, в котором основной вклад в ограничивающее действие вносит обедненный слой твердого раствора.

2. Темновой ток гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$ для отрицательной полярности внешнего напряжения определяется барьером Шоттки между слоем твердого раствора и индиевым электродом.

3. В гетероструктуре $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$ под влиянием слоя твердого раствора происходит инверсия типа проводимости в субмикронном слое селенида цинка.

¹ Для лучшей демонстрации результатов обе характеристики показаны на одном рисунке, хотя они и измерались при противоположных полярностях внешнего напряжения.

² Формула (3) позволяет оценить и величину барьера между твердым раствором и индием, если за J_s отрицательной ветви ВАХ принять точку перегиба. В этом случае $\varphi_B \approx 1$ эВ.

- [1] S. Fujwara, T. Chikamura, M. Fakai. Cryst. Growth., 61, 567 (1983).
 [2] Н. Н. Берченко, В. Е. Кревс, В. Г. Средин. Полупроводниковые твердые растворы и их применение, 208. М. (1982).
 [3] А. Милнс, Д. Фойхт. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник, 432. М. (1975).
 [4] А. П. Беляев, В. П. Рубец, Х. А. Тошходжаев. ФТП, 26, 935 (1992).
 [5] С. Зи. Физика полупроводниковых приборов, 455. М. (1984).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 27, вып. 3, 1993

ТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ КАК ПРИЧИНА ТОКА, ОГРАНИЧЕННОГО КОНТАКТНОЙ ЭМИССИЕЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$

А. П. Беляев, В. П. Рубец, Х. А. Тошходжаев, И. П. Калинин

Санкт-Петербургский технологический институт, Санкт-Петербург, Россия
 (Получено 9.06.1992. Принято к печати 8.10.1992)

В [1] рассмотрены электронные процессы в гетероструктуре $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$. Поскольку в указанной публикации проанализированы процессы, имеющие место лишь при напряжениях менее одного вольта, настоящая работа посвящена стационарному токопереносу при более высоких внешних смещениях. В гетероструктурах (ГС), приготовленных аналогично [1], измерялись вольт-амперные (ВАХ) и температурные характеристики. Все измерения проводились при приложении отрицательного полюса внешнего источника к слою оксида индия. Температурные зависимости проводимости исследовались при охлаждении образца.

Основные результаты исследований представлены на рис. 1, 2.

ВАХ ГС $\text{In}_2\text{O}_3\text{—ZnSe—}(\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te})_{1-y}(\text{In}_2\text{Te}_3)_y\text{—In}$, представленная на рис. 1 (кривая 1), имеет вид, типичный для обратнсмещенного барьера типа Шоттки. В [1] показано, что таким барьером является барьер между широкозонным дырочным полупроводником — слоем твердого раствора — и слоем индия. В этом случае участок ВАХ при напряжениях более 1 В, очевидно, связан с пробоем этого барьера. Отсутствие необратимых изменений в ГС после воздействия внешнего напряжения и ослабление полевой зависимости тока при напряжениях более 6 В, позволяют считать основным механизмом пробоя туннелирование. Наше утверждение подтверждается наблюдаемым экспериментально ослаблением температурной зависимости тока при увеличении внешнего напряжения, которое демонстрирует рис. 2. Активационный характер токопереноса не противоречит сделанному выводу, так как подобное, согласно [2], имеет место при сложном характере процесса туннелирования.

Резкий рост тока при напряжениях свыше 1 В заставляет предположить, что в этой области напряжений в результате туннелирования сквозь барьер имеет место инжекция носителей в слой твердого раствора, в результате чего основным фактором, ограничивающим ток через ГС, становится объемный инжектированный заряд. Такое предположение коррелирует с данными, показанными на рис. 1, где кривая 1 соответствует темновой экспериментальной ВАХ ГС, а кривая 2 теоретической зависимости