

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, О. И. КУШНИР,  
к. ф.-м. н. О. Н. СИДОР, к. ф.-м. н. В. В. НЕТЯГА

Украина, Черновицкое отд. ИПМ им. И. Н. Францевича  
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

Дата поступления в редакцию  
10.10 2008 г.

Оппонент д. х. н. В. Н. ТОМАШИК  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ОТЖИГА МОНОКРИСТАЛЛОВ InSe В ПАРАХ СЕРЫ

*Исследованы электрические и фотоэлектрические характеристики гетероструктур InS/InSe, полученных при длительном отжиге монокристаллов InSe n- и p-типа проводимости в парах серы.*

Слабая ван-дер-ваальсовая связь между слоями полупроводников  $A^{III}B^{VI}$  позволяет легко получать пластины этих соединений любой, вплоть до микронной, толщины с практически идеальной зеркальной поверхностью. Они не требуют дополнительных работ и поэтому с практической точки зрения удобны при изготовлении гетероструктур (ГС). На слоистых кристаллах были созданы и широко исследованы структуры, сформированные методом посадки на оптический контакт [1] или же термическим окислением InSe [2]. Поэтому полупроводники группы  $A^{III}B^{VI}$  остаются перспективным материалом для создания эффективных фотопреобразователей. В данной работе предложен новый метод формирования ГС на основе селенида индия — гетеровалентное замещение атомов Se подложки на серу.

### Методика эксперимента

Монокристаллы селенида индия выращивали вертикальным методом Бриджмена из расплава нестехиометрического состава  $In_{1,03}Se_{0,97}$ . Они обладали n-типом проводимости с концентрацией свободных носителей заряда  $n=4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и холловской подвижностью  $\mu=650 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T=300 \text{ К}$ . Для получения дырочной проводимости исходные кристаллы легировали кадмием (массовая доля 0,2%), что приводило к получению следующих параметров:  $p=10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $\mu=80 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  при  $T=300 \text{ К}$ .

Процесс сульфуризации монокристаллов InSe обоих типов проводимости проводили в заранее вакуумированных и герметически запаянных пирексовых ампулах в специально сконструированной трубчатой печи. Образцы (средний размер  $12 \times 7 \times 0,4 \text{ мм}$ ) и навеску серы размещали в противоположных концах ампулы, где температура во время отжига поддерживалась постоянной и равной 523 и 453 К, соответственно. При этом давление насыщенных паров серы составляло 146,65 Па. Длительность процесса отжига составляла 24—120 ч. В результате гетеровалентного замещения атомов селена подложки на атомы серы на поверхности исходных кристаллов фор-

мировалась однородная пленка сульфида индия. Она обладала электронным типом проводимости, что определялось по знаку термо-эдс. Затем образцы разделяли на отдельные элементы, толщину которых доводили до 70—80 мкм путем многократного скалывания слоев. Площадь  $S$  полученных ГС составляет  $0,25 \text{ см}^2$ . В качестве омических контактов использовали чистый индий.

### Результаты исследований и их обсуждение

Были исследованы различные характеристики полученных ГС: фотовольтаические, вольт-амперные (ВАХ) в температурном диапазоне 253—320 К, вольт-фарадные (ВФХ) на частотах 10, 20 и 30 кГц и спектральные зависимости фотоответа.

Коэффициент выпрямления  $k$  изотипных ГС n-InS/n-InSe незначителен и составляет 6 при напряжении  $V=2 \text{ В}$ . Была сделана попытка измерить ВФХ образцов, но слабая зависимость емкости от обратного смещения, а также вид ВАХ, говорит о малой высоте барьера такой структуры. На это также указывает небольшая величина напряжения холостого хода  $V_{\text{хх}}$  (см. таблицу).

### Фотоэлектрические характеристики ГС

Тип структуры	$V_{\text{хх}}$ , мВ	$J_{\text{кз}}$ , мкА/см <sup>2</sup>	$FF$	$k$ (при $V=2 \text{ В}$ )	$n$	$S_I$ , мА/Вт	$S_V$ , В/Вт
n-InS/n-InSe	4	110	0,25	6	—	0,25	21
n-InS/p-InSe	280	400	0,3	200	1,5	44	$10^4$

Здесь  $J_{\text{кз}}$  — ток короткого замыкания;  $FF$  — фактор заполнения;  $S_I$ ,  $S_V$  — монохроматические (при  $\lambda=0,98 \text{ мкм}$ ) вольт-амперная и вольт-ваттная чувствительности, соответственно.

Значительно лучшими параметрами обладали анизотипные переходы n-InS/p-InSe — для них  $k=200$  (см. таблицу). На рис. 1 видно, что наклон прямолинейных участков ВАХ данных ГС изменяется в зависимости от температуры, а определенный отсюда диодный коэффициент  $n=1,5$  свидетельствует о надбарьерном характере протекания тока.

При освещении ГС n-InS/p-InSe со стороны пленки сульфида индия вольфрамовой лампой с плотностью потока излучения  $P=100 \text{ мВт/см}^2$  наблюдался фотовольтаический эффект.

На рис. 2 представлены ВФХ ГС n-InS/p-InSe. Линейность характеристик свидетельствует о резком

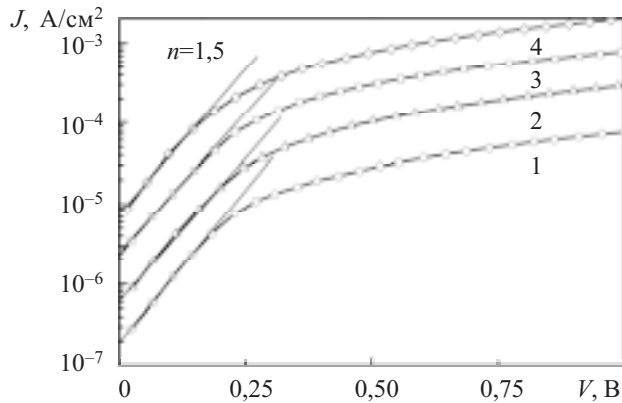


Рис. 1. ВАХ ГС *n*-InS/*p*-InSe при различных значениях температуры (в К): 1 — 253; 2 — 270; 3 — 290; 4 — 320

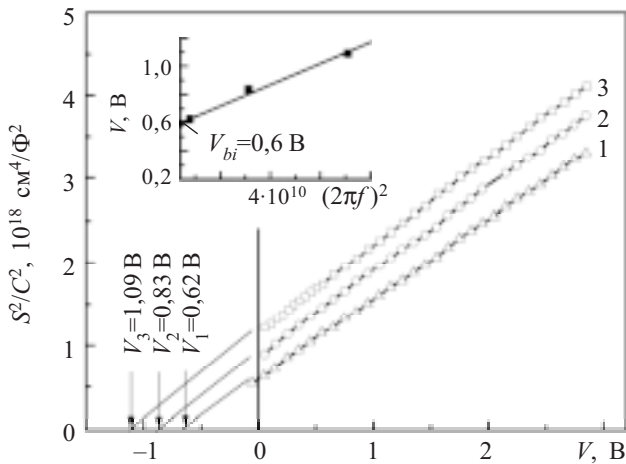


Рис. 2. ВФХ ГС *n*-InS/*p*-InSe при различных частотах (в кГц): 1 — 10; 2 — 20; 3 — 30

*p*-*n*-переходе полученных ГС, а их частотная зависимость — о влиянии последовательного сопротивления базы. Используя методику [3], по отсечкам, которые дают ВФХ при каждой частоте, была построена зависимость  $V$  от  $(2\pi f)^2$  (см. вставку). Полученная из нее величина встроенного потенциала  $V_{bi}$  гетероструктуры составила  $\approx 0,6$  В.

На рис. 3 показаны спектральные зависимости фотоответа  $\eta$  от энергии фотонов  $h\nu$  для ГС *n*-InS/*p*-InSe, полученных при разной длительности отжига. Величина  $\eta$  определялась отношением фототока к числу падающих фотонов. При минимальном времени термообработки (кривая 1) в ГС начинает формироваться край, где поглощение происходит в сульфиде индия, но из-за небольшой толщины пленки (измерялась эллипсометрическим методом) наблюдается значительная фоточувствительность в коротковолновой области спектра. С увеличением длительности отжига (кривая 2) высокоэнергетический поглощающий край ГС InS/InSe становится более выраженным, что связано с утолщением формируемой пленки. Для максимального времени термообработки (кривая 3) на зависимости четко наблюдается так называемый эффект “окна”, где область фоточувствительности ограничена краями собственного поглощения селенида индия и сульфида индия. Экстраполяция прямолинейных участков зависи-

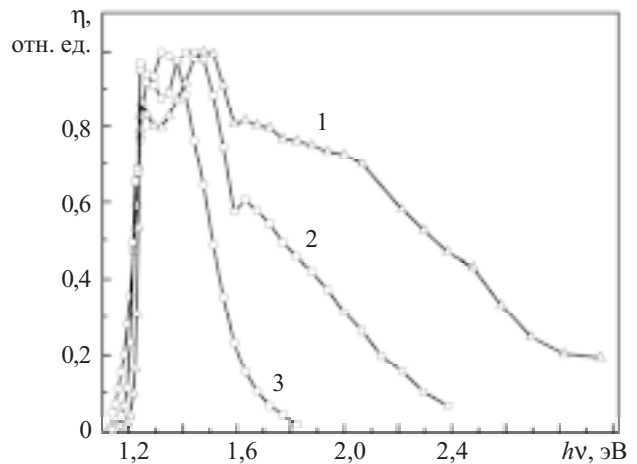


Рис. 3. Спектральные зависимости фотоответа для ГС *n*-InS/*p*-InSe, полученных при различном времени отжига (в часах): 1 — 24; 2 — 72; 3 — 120

мости ( $\eta h\nu$ )<sup>2</sup>= $f(h\nu)$  и ( $\eta h\nu$ )<sup>1/2</sup>= $f(h\nu)$  позволила определить величины прямых и непрямых межзонных переходов, которые составили  $E_g^d \approx 1,7$  эВ и  $E_g^{in} \approx 1,95$  эВ, соответственно, что вполне согласуется с литературными данными для InS [4].

Параметры элементарной ячейки полученных кристаллических пленок InS, определенные рентгеновским методом —  $a=3,94\pm 0,02$  Å,  $b=4,44\pm 0,04$  Å,  $c=10,65\pm 0,03$  Å — совпадают с приведенными в [5, с. 114].

**Выводы**

Установлено, что длительный отжиг монокристаллов селенида индия в парах серы при определенных режимах приводит к образованию выпрямляющих структур InS/InSe, причем по своим характеристикам анизотипная ГС *n*-InS/*p*-InSe существенно превосходит ее изотипный аналог. Характер протекания тока в такой ГС обусловливается надбарьерным механизмом.

Представленные результаты указывают, что выбранные температура и длительность процесса термообработки позволяют получать полупроводниковые переходы с удовлетворительными характеристиками. Такие структуры могут найти применение в качестве узкоселективных фотопреобразователей оптического излучения.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Бакуменко В. Л., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н. и др. Исследование гетеропереходов InSe–GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт // Физика и техника полупроводников.— 1980.— Т. 14, № 6.— С. 1115—1119.
2. Катеринчук В. Н., Ковалюк З. Д. Гетеропереходы из InSe, сформированные термическим окислением кристаллической подложки // Письма в ЖТФ.— 1992.— Т. 18, № 12.— С. 70—72.
3. Goodman A. M. Metal–semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method — one carrier system // Journal of Applied Physic.— 1963.— Vol. 34, N 2.— P. 329—338.
4. Qasrawi A. F., Gasanly N. M. Photoelectronic and electrical properties of InS crystals // Semiconductor Science Technology.— 2002.— Vol. 17.— P. 1288—1292.
5. Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников.— К.: Наукова думка, 1987.