

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 обработок 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 форми-

ровалась 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/p-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_{xx} (см. таблицу).

Фотоэлектрические характеристики ГС

Тип структуры	V_{xx} , мВ	$J_{кз}$, мкА/см ²	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 $J_{кз}$ — 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

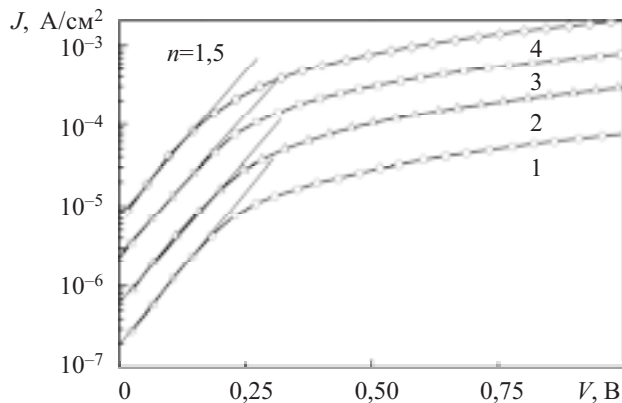


Рис. 1. ВАХ ГС $n\text{-InS}/p\text{-InSe}$ при различных значениях температуры (в К): 1 — 253; 2 — 270; 3 — 290; 4 — 320

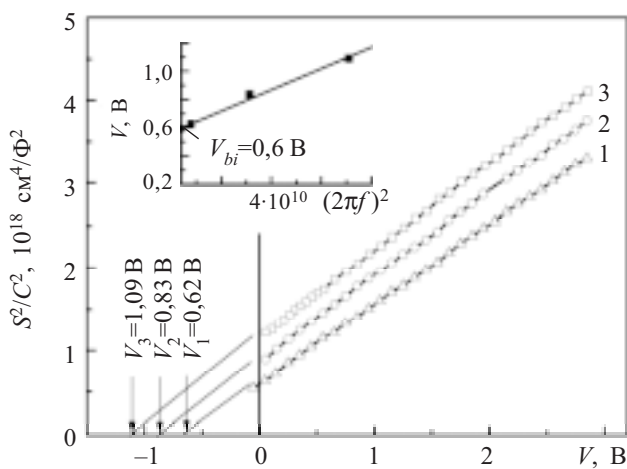


Рис. 2. ВФХ ГС $n\text{-InS}/p\text{-InSe}$ при различных частотах (в кГц): 1 — 10; 2 — 20; 3 — 30

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 η от энергии фотонов $h\nu$ для ГС $n\text{-InS}/p\text{-InSe}$, полученных при разной длительности отжига. Величина η 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-

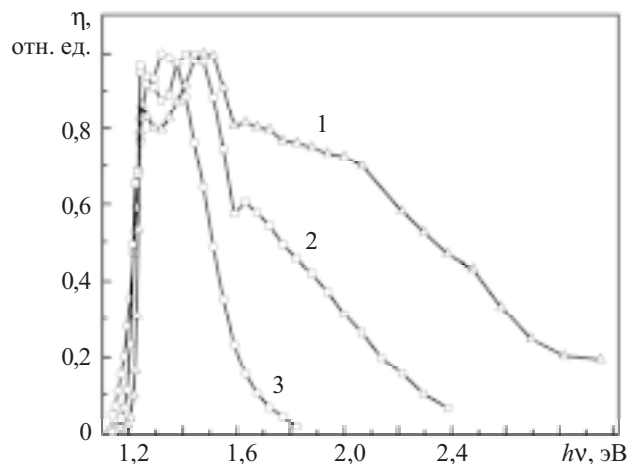


Рис. 3. Спектральные зависимости фотоответа для ГС $n\text{-InS}/p\text{-InSe}$, полученных при различном времени отжига (в часах): 1 — 24; 2 — 72; 3 — 120

мостей $(\eta h\nu)^2 = f(h\nu)$ и $(\eta h\nu)^{1/2} = f(h\nu)$ позволила определить величины прямых и непрямых межзонных переходов, которые составили $E_g^d \approx 1,7$ эВ и $E_g^m \approx 1,95$ 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 $n\text{-InS}/p\text{-InSe}$ 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.