

06;07;12

## Гетеропереходы $n$ -SnSSe– $p$ -InSe

© В.Н. Катеринчук, З.Д. Ковалюк, В.В. Нетяга, Т.В. Беца

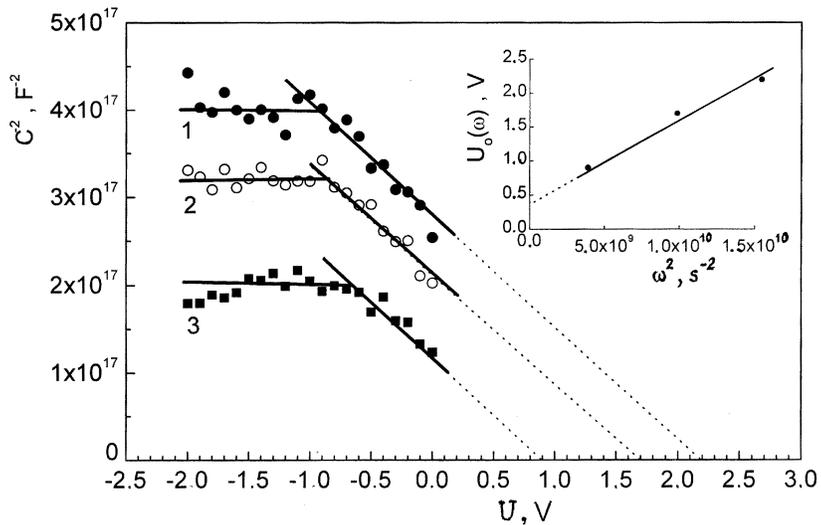
Институт проблем материаловедения НАН Украины, Черновцы

Поступило в Редакцию 15 февраля 2000 г.

Исследованы фотоэлектрические свойства гетероперехода (ГП)  $n$ -SnSSe– $p$ -InSe, особенностью которого есть использование в качестве материала широкозонного "окна" твердых растворов  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$  ( $x = 0.5$ ). Такие соединения позволяют изменять коротковолновую границу полосы фоточувствительности ГП, которая для данного ГП лежит в пределах  $0.8\text{--}1.0\ \mu\text{m}$ . Показано, что использование слоистых кристаллов и метода посадки на оптический контакт при изготовлении ГП дает возможность реализации качественных  $p$ – $n$ -переходов.

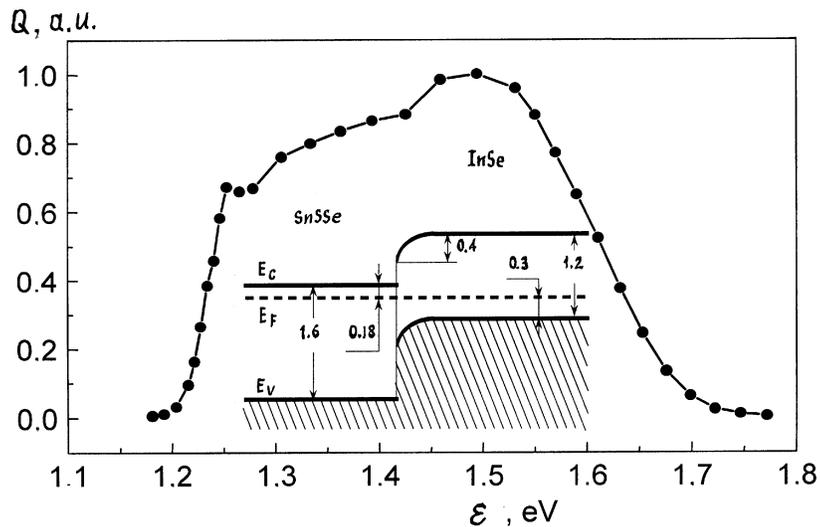
Спектральная характеристика фоточувствительности ГП зависит от составляющих его компонент и может быть изменена, например, путем использования, кроме бинарных соединений, их твердых растворов. В случае слоистых соединений, где нет жестких требований в подборе полупроводников при изготовлении ГП путем их оптического контакта [1], задача изменения спектральной характеристики легко решается. В данной работе исследуются свойства нового ГП SnSSe–InSe, широкозонным "окном" которого служит соединение SnSSe из системы непрерывных твердых растворов  $\text{SnS}_2$ – $\text{SnSe}_2$ .

Кристаллы SnSSe выращивались методом химических транспортных реакций. Качественные образцы кристаллов небольших размеров получались в виде хаотически ориентированных по ампуле пластин. Они обладали электронной проводимостью с концентрацией основных носителей тока  $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ . Образцы InSe получали путем расщепления на отдельные пластины слитков, выращенных методом Бриджмена. Для получения дырочной проводимости InSe проводилось их легирование примесью кадмия. Концентрация дырок в  $p$ -InSe составила  $(6\text{--}8) \cdot 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$ . Данные о концентрациях основных носителей тока использовались при определении уровней Ферми в соответствующих полупроводниках. ГП изготавливались методом, описанным в [1]. В качестве омических контактов использовался чистый индий.



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики гетероперехода SnSSe-InSe при различных частотах: 1 — 19.8 kHz; 2 — 15.8; 3 — 9.95. На вставке — частотная зависимость емкостного напряжения отсечки.  $T = 295$  K.

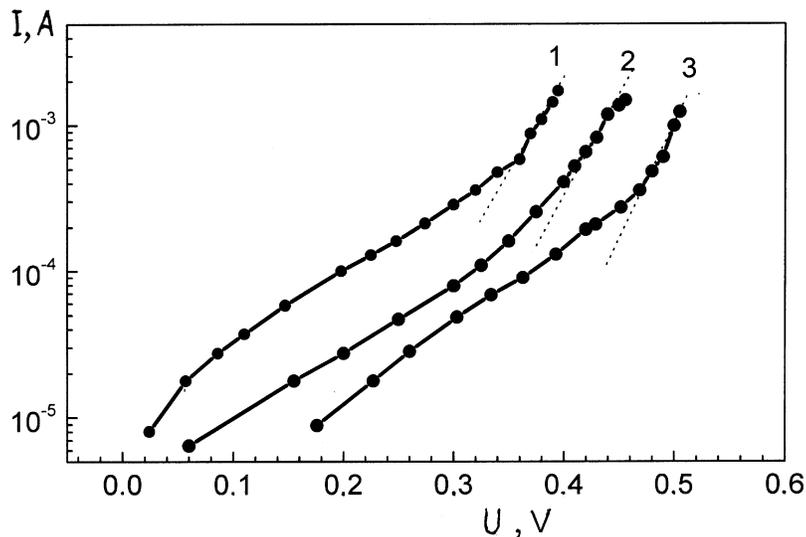
Образцы ГП оказались фоточувствительны, и для подтверждения качества ГП снимались их фотоэлектрические характеристики. На рис. 1 показаны вольт-фарадные характеристики (ВФХ), позволившие определить тип  $p$ - $n$ -перехода и высоту энергетического барьера. В координатах  $C^{-2}(U)$  ВФХ линейны, что соответствует модели резкого перехода. Излом ВФХ при больших обратных смещениях обусловлен расширением обедненной области ГП на оба полупроводника. Отличие ВФХ при различных частотах связано с влиянием на эти характеристики последовательного сопротивления [2]. При размещении  $p$ - $n$ -перехода в плоскости слоев кристаллов протекание тока осуществляется в направлении, перпендикулярном этим плоскостям. Ввиду большой анизотропии проводимости вдоль и поперек слоев для исследованных ГП последовательное сопротивление существенно и его учитывают при анализе как ВФХ, так и других характеристик. Продолжения линейных зависимостей  $C^{-2}(U)$  дают значения напряжений отсечки, существенно



**Рис. 2.** Спектр фоточувствительности гетероперехода SnSSe–InSe при комнатной температуре ( $Q$  — квантовая эффективность). На вставке — зонная энергетическая диаграмма гетероперехода в равновесных условиях (все значения выражены в электронвольтах).

отличающиеся друг от друга. Это связано с тем, что реактивное и активное сопротивление ГП сравнимы и перераспределение тестирующего напряжения в пользу реактивной составляющей происходит при низких частотах измерений. Чем меньше частота измерений, тем точнее определение величины контактной разности потенциалов  $U_0$ . Аппроксимация значений  $U_0(\omega)$  к нулевой частоте [3] позволила определить действительное значение  $U_0 = 0.4 \text{ V}$  (вставка на рис. 1).

На вставке к рис. 2 показана зонная энергетическая диаграмма ГП в равновесных условиях. Весь изгиб зон приходится на InSe из-за различий в концентрациях основных носителей тока в InSe и SnSSe. Из полученного геометрического построения диаграммы следует, что разрывы разрешенных зон составляют:  $\Delta E_c = 0.32 \text{ eV}$  и  $\Delta E_v = 0.72 \text{ eV}$ . Поэтому преимущество в преодолении суммарного ( $\Delta E_{c(v)} + \varphi_0$ ) энергетического



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики гетероперехода SnSSe-InSe при различных температурах: 1 — 300 К; 2 — 270; 3 — 240. Пунктирные линии — расчетные зависимости ВАХ идеальных диодов.

барьера ГП имеют электроны зоны проводимости по сравнению с дырками валентной зоны.

Механизм протекания тока в гетеропереходе определялся с помощью исследования температурных зависимостей прямых ветвей вольт-амперных характеристик (ВАХ), которые представлены на рис. 3. При этом измерялись не темновые прямые ВАХ ГП, а их фотоэлектрический аналог — фототок-фотоэдс при различных уровнях освещения [4]. Это позволило избежать трудностей в интерпретации ВАХ ГП, особенно при низких температурах, где влияние последовательного сопротивления на измерения ВАХ более существенно. В то же время фотоэлектрическая модификация измерений прямых ветвей ВАХ не позволяет исследовать характеристики при более высоких прямых напряжениях, превышающих напряжение холостого хода. Из рисунка видно, что существуют два линейных участка на кривых  $I(U)$ , отложенных в полулогарифмических координатах. Протяженный первый из них характеризуется диодным

коэффициентом ВАХ ( $n$ ), значительно превышающим единицу. Этот участок ВАХ ГП обычно связывают с токами утечек [5], поскольку ему соответствуют низкие значения тока и наклон ВАХ зависит от тщательности приготовления образцов. Для короткого второго участка ВАХ экспериментальные точки сопоставлены с теоретически расчетными ВАХ идеальных диодов, для которых  $n = 1$ . Хорошо видно качественное совпадение этих кривых. Это позволяет заключить, что начиная с некоторого напряжения прямой диффузионный ток через ГП начинает превосходить токи утечек из-за различной экспоненциальной зависимости этих токов. Поэтому основным механизмом протекания тока через ГП SnSSe–InSe следует считать диффузионный.

Спектральная характеристика фоточувствительности ГП показана на рис. 2. Она имеет вид полосы, пределы которой определяются фундаментальным поглощением света в InSe ( $E_g = 1.2\text{ eV}$ ) и SnSSe ( $E_g = 1.6\text{ eV}$ ) [6]. Поскольку возможно применение твердых растворов SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub> любого другого состава  $x$ , то можно получать отличные спектральные полосы фоточувствительности на основе ГП из слоистых полупроводников, высокое качество которых подтверждено исследованиями ГП SnSSe–InSe.

## Список литературы

- [1] Бакуменко В.Л., Чижко В.Ф. // ФТП. 1977. Т. 11. С. 2000.
- [2] Goodman A.M. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. P. 329.
- [3] Гольдберг Ю.А., Иванова О.В., Львова Т.В., Царенков Б.В. // ФТП. 1984. Т. 18. С. 1472.
- [4] Манассон В.А., Малик А.И. // ПТЭ. 1981. № 5. С. 190.
- [5] Катеринчук В.Н., Ковалюк М.З. // ФТП. 1991. Т. 25. С. 954.
- [6] Perluzzo G., Jandl S., Aubin M., Girard P.E. // Sol. State Commun., 1978. V. 27. P. 1437.