

К. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК, М. З. КОВАЛЮК

Украина, г. Черновцы, ЧО Ин-та проблем материаловедения  
им. И. Н. Францевича  
E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
17.01.2006 г.

Оппонент д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ  
(Ин-т термоэлектричества, г. Черновцы)

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$ ( $0 \leq x \leq 1$ )

*Методом оптического контакта полупроводников изготовлены гетеропереходы  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$ . Анализ электрических свойств свидетельствует, что они соответствуют диодам с идеальными характеристиками.*

Для кристаллов со слоистой кристаллической структурой наиболее простым методом создания гетеропереходов является метод посадки на оптический контакт [1]. Он позволяет изготавливать образцы гетеропереходов соприкосновением свежеисколотых на воздухе пластин из разных соединений кристаллов при комнатной температуре.

Если для двух полупроводников необходим подбор идентичных кристаллических решеток, их постоянных и коэффициентов линейного расширения [2], то в случае слоистых кристаллов качественные гетеропереходы можно получить даже тогда, когда эти параметры сильно отличаются друг от друга [3—5]. Это позволяет создавать новые гетеропереходы с отличительными фотоэлектрическими свойствами, открывающими возможность получения более высоких удельных характеристик.

В настоящей работе исследованы фотоэлектрические параметры гетероперехода  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x\text{-InSe}$  в зависимости от величины  $x$  ( $0 \leq x \leq 1$ ), где  $x$  определяет состав твердых растворов  $\text{SnS}_2\text{-SnSe}_2$ .

### Эксперимент

Кристаллы  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$  выращивались методом химических транспортных реакций. Для этого в вакуумированной ампуле на одном ее конце помещалось соответствующее синтезированное соединение. Температурное градиентное поле и переносчик вещества йод создавали условия роста кристаллов на другом конце ампулы. Кристаллы получались в виде хаотически ориентированных по ампуле пластин различных размеров. Все пластинки обладали зеркальной поверхностью. Из эффекта Холла установлено, что при  $x=0$ ,  $x=0,1$  образцы имели  $n$ -тип проводимости с концентрацией основных носителей тока  $n=10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и их подвижностью  $\mu_{\perp C} \approx 20 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , где  $C$  — кристаллографическая ось, совпадающая с нормалью к плоскости слоя. Удельное сопротивление соединений  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$  при больших значениях  $x$  отличалось более высокими значениями.

Кристаллы  $\text{InSe}$   $p$ -типа проводимости выращивались вертикальным методом Бриджмена. Слитки кри-

сталлов имели в диаметре 16—18 мм, а длину — 6—10 см. Благодаря слоистой структуре тонкие пластины из этих слитков вырезались с помощью бритвенного лезвия. Дополнительное отщепление слоев с помощью липкой ленты позволяло получать образцы с зеркальной поверхностью без царапин и других ее повреждений. Поскольку специально не легированные кристаллы имеют всегда  $n$ -тип проводимости, то для его изменения они легировались примесью кадмия в количестве 0,1—0,5 мас.%. Холловские измерения позволили определить, что концентрация основных носителей тока составляет  $p \approx 5 \cdot 10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а их подвижность  $\mu_{\perp C} \approx 80 \dots 100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ .

Свежеисколотые пластины  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$  и  $\text{InSe}$  приводились в тесный механический контакт. Удержание этих разнородных пластин аналогично связи слоев в каждом из слоистых кристаллов, которое обеспечивается ван-дер-ваальсовыми силами. Для широкозонного фронтального полупроводника использовались тонкие (20—30 мкм) пластины  $\text{SnS}_{2-x}\text{Se}_x$ , в качестве базового  $p\text{-InSe}$  — толщиной 200—400 мкм. Для токовых контактов применялся чистый индий. Площадь изготовленных образцов составляла 0,08—0,12  $\text{см}^2$ .

Спектры фоточувствительности изготовленных гетеропереходов исследовались с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Все спектры нормировались относительно количества падающих фотонов.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ) гетеропереходов исследовались на установке Schlumberger SI 1255 с компьютерным интерфейсом. Все измерения проводились при комнатной температуре. Температурные зависимости ВАХ исследовались также с помощью фотоэлектрической методики ее измерения (фото-эдс от фототока насыщения).

### Результаты исследований

Спектральные зависимости квантовой эффективности фототока  $\eta$  исследуемых гетеропереходов показаны на рис. 1. Полоса фоточувствительности гетероперехода определяется поглощением света в соответствующих полупроводниках. Длинноволновый край спектра различных гетеропереходов во всех случаях обусловлен поглощением света в  $\text{InSe}$ , ширина запрещенной зоны которого  $E_g$  при комнатной температуре равна 1,2 эВ [6]. Широкозонный фронтальный полупроводник не препятствует прохождению света

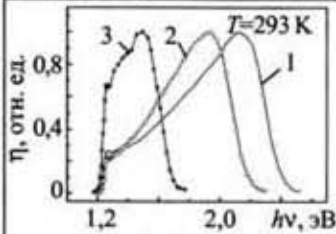


Рис. 1. Спектр квантовой эффективности фототока гетероперехода SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe: 1 — x=0; 2 — x=0,4; 3 — x=1

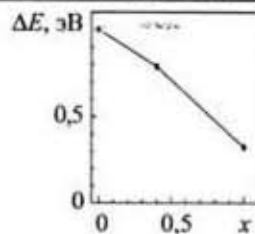


Рис. 2. Зависимость ширины полосы фоточувствительности от величины x

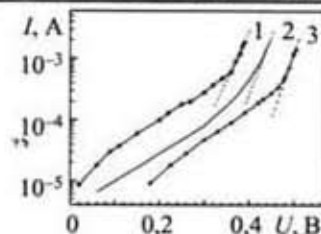


Рис. 3. Температурные зависимости ВАХ гетеропереходов SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe для x=1: 1 — 300 К; 2 — 270 К; 3 — 240 К

до тех пор, пока энергия квантов  $h\nu$  не достигнет величины  $E_g$  SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>. В этом случае свет поглощается в приповерхностной области, не доходит до границы гетероперехода, и разделение фотогенерированных носителей прекращается. Отметим, что ширина запрещенной зоны твердого раствора может изменяться от 0,97 эВ для SnSe<sub>2</sub> до 2,07 эВ для SnS<sub>2</sub> [7].

На рис. 2 показана зависимость величины полосы фоточувствительности  $\Delta E$  от состава x твердого раствора SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>. Хорошо видно, что изменением x можно создавать селективные фотоприемники различной полосы фоточувствительности.

Фотоэлектрические параметры гетеропереходов SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe при T=293 К приведены в таблице ( $U_{xx}$  — напряжение холостого хода,  $I_{кс}$  — ток короткого замыкания).

Параметры гетеропереходов

x	$U_{xx}$ , В	$J_{кс}$ , мА/см <sup>2</sup>	$\phi_b$ , эВ	$\Delta E$ , эВ
0	0,5	6,8	0,75	1
0,4	0,33—0,35	1,25	0,35	0,8
0,5	0,3—0,35	1,0	0,35	—
1	0,34—0,4	0,33	0,4	0,32

Результаты измерений емкости C гетеропереходов показали, что в координатах  $1/C^2$  от U они имеют линейный характер. Это свидетельствует о резком типе всех созданных p-n-переходов. Найденные из ВФХ значения высоты потенциального барьера  $\phi_b$  позволили качественно проанализировать энергетическую диаграмму гетеропереходов. Вследствие различия в концентрациях носителей полупроводников обедненная область и весь изгиб энергетических зон приходится на более высокоомный InSe. Во всех случаях исследованных гетеропереходов  $\phi_b < E_g/2$  при  $x > 0$  (см. табл.). Однако для  $x=0$ , наоборот,  $\phi_b > E_g/2$ . В этом случае мы имеем ситуацию возникновения инверсионного слоя у межфазной границы гетероперехода и смещения p-n-перехода вглубь InSe. Более детально характеристики гетеропереходов с большим потенциальным барьером рассмотрены в работе [8]. Найденные значения  $\phi_b$  хорошо согласуются с измерениями фото-зс насыщения гетеропереходов, которые также приведены в таблице.

Качество изготовленных гетеропереходов проверялось на основании температурных измерений их ВАХ. В качестве примера на рис. 3 представлены ВАХ гетероперехода SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe при x=1. Из рисунка видно, что существуют два линейных участка на кривых  $I(U)$ , отложенных в полулогарифмических координатах. Первый из них, протяженный, характеризуется диодным коэффициентом ВАХ (n), значительно превышающим единицу. Этот участок ВАХ гетероперехода

обычно связывают с токами утечек [9], поскольку ему соответствуют низкие значения тока, и наклон ВАХ, который определяет само значение n, зависит от тщательности приготовления образцов. Для второго — короткого участка ВАХ экспериментальные точки сопоставлены с теоретически рассчитанными ВАХ идеальных диодов (пунктирная линия), для которых  $n=1$  [10].

Хорошо видно качественное совпадение этих кривых. Это позволяет заключить, что начиная с некоторого напряжения прямой диффузионный ток через гетеропереход начинает превосходить токи утечек из-за различной экспоненциальной зависимости этих токов. Поэтому основным механизмом протекания тока через гетеропереход SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe следует считать диффузионный. Аналогичные ВАХ характерны и для гетеропереходов SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe с другими значениями x.

**Выводы**

Методом оптического контакта полупроводников изготовлены гетеропереходы SnS<sub>2-x</sub>Se<sub>x</sub>-InSe. Твердые растворы SnS<sub>2</sub>-SnSe<sub>2</sub> способствуют получению кристаллов с различной шириной запрещенной зоны: от 1,48 до 2,12 эВ при  $0 \leq x \leq 1$ . Используемые в качестве широкозонного окна гетероперехода они изменяют его фотоотклик до нужной ширины полосы фоточувствительности.

Анализ электрических свойств полученных гетеропереходов свидетельствует, что они соответствуют диодам с идеальными характеристиками: p-n-переход имеет резкий характер, а экспоненциальная зависимость тока от напряжения описывается диодным коэффициентом  $n=1$  при  $U > 0,35$  В.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Бакуменко В. Л., Чижко В. Ф. Электрические свойства оптических контактов слоистых полупроводников // ФТП. — 1977. — Т. 11, № 10. — С. 2000—2002.
2. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. — М.: Мир, 1975.
3. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З., Огородник А. Д. Гетероструктуры на основе селенидов индия // Неорг. материалы. — 1996. — Т. 32, № 8. — С. 937—940.
4. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Гетеропереходы на основе GaTe // Письма в ЖТФ. — 1999. — Т. 25, № 2. — С. 29—33.
5. Катеринчук В. М., Ковалюк З. Д., Товарицкий М. В. Гетеропереход GaSe-InSe из властивостями структур напівпровідник-тонкий діелектрик-напівпровідник // УФЖ. — 2000. — Т. 45, № 1. — С. 87—91.
6. Landolt-Börnstein. Numerical data and functional relationships in science and technology. New ser. Group III: Crystal and solid state physics. Vol. 17, sv.f / Ed. by O. Madelung. — Berlin e. a.: Springer, 1983.
7. Domingo G., Itoga R. S., Kannewurf C. R. Fundamental optical absorption in SnS<sub>2</sub> and SnSe<sub>2</sub> // Phys. Rev. — 1966. — Vol. 143, N. 2. — P. 536—541.
8. Катеринчук В. Н., Ковалюк М. З. Photoelectric properties of n-SnS<sub>2</sub>-p-InSe heterojunction // J. Advanced Materials. — 1997. — Vol. 4, N 1. — P. 40—43.
9. Манассон В. А., Малик А. И., Баранюк В. Б. Эффективный солнечный элемент для работы при низких уровнях освещенности // Письма в ЖТФ. — 1981. — Т. 7, № 9. — С. 549—552.
10. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2. — М.: Мир, 1984.