

8. Amirtharaj P. M., Pollak F. H. Raman scattering study of the properties and removal of excess Te on CdTe surfaces // Appl. Phys. Lett.— 1984.— Vol. 45, N 7.— P. 789—791.

9. Дымко Л. Н., Кица М. С., Лихобабин Н. П. Исследование эффекта переключения в монокристаллах CdTe // Физическая электроника. (Львов.)—1987.— № 34.— С. 33—36.

10. Легбайн Д., Шелонин Е. Исследование влияние поверхности на поведение дефектов в кремнии, облученном нейтронами // ФТП.— 1984.— Т. 18, вып. 5.— С. 808—811.

11. Логинов Ю. Ю., Браун П. Д. Образование примесных выделений в CdTe, легированном индием, после отжига и облучения ионами и электронами // ФТТ.— 1995.— Т. 37, вып. 10.— С. 3115—3123.

12. Стрекалов В. Н. Диффузия в условиях лазерного отжига полупроводников // ФТП.— 1986.— Т. 20, вып. 2.— С. 361—363.

13. Байдуллаева А., Джумаев Б., Корсунская Н. Е. и др. Влияние пленки Te, образующейся на поверхности CdTe при лазерном облучении, на их электрические и фотоэлектрические свой-

ства. Имитация эффектов, связанных с метастабильными дефектами // Поверхность. Физика, химия, механика.— 1989.— № 2.— С. 129—133.

14. Дрижук А. Г., Сидоров В. Г., Сидоров Д. В., Шагало М. Д. Переключающее устройство на гетероструктуре ZnTe—GaN // Письма в ЖТФ.— 1997.— Т. 23, вып. 20.— С. 79—82.

15. Дрижук А. Г., Сидоров В. Г., Сидоров Д. В., Шагало М. Д. Фотоприемник с переключением и памятью на гетероструктуре CdS—GaN // Там же.— С. 75—78.

16. Агринская Н. В., Алексеенко М. В., Матвеев О. А. Явления формовки и переключения в кристаллах CdTe // ФТП.— 1975.— Т. 9, вып. 10.— С. 1962—1965.

17. Костыльёв С. А., Шкут В. А. Электронное переключение в аморфных полупроводниках.— Киев: Наукова думка, 1978.

18. Меден А., Шо М. Физика и применение аморфных полупроводников.— М.: Мир, 1991.

19. Чабан И. А. Эффект переключения в халькогенидных стеклах // ФТТ.— 2007.— Т. 49, вып. 3.— С. 405—410.

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, к. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК,  
к. ф.-м. н. В. В. НЕТЯГА, А. В. ЗАСЛОНКИН

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

Дата поступления в редакцию  
05.07 2007 г.

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

## ГЕТЕРОПЕРЕХОД НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА $FeIn_2Se_4$ , ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ БРИДЖМЕНА

*Фотоэлектрические измерения параметров гетероперехода  $n-InSe-p-FeIn_2Se_4$  свидетельствуют о возможности получения качественных  $p-n$ -переходов.*

Магнитные свойства полупроводников могут использоваться для управления потоком носителей не только с помощью величины и полярности электрического напряжения, но и с помощью изменения направления и величины напряженности магнитного поля. В этой связи интерес к слоистым магнитным полупроводникам обусловлен сильной анизотропией их свойств и, как следствие, возможностью неоднородного распределения примеси в кристаллической решетке. Различные состояния магнитной примеси могут приводить к образованию ферромагнитных доменов, что представляет интерес для практических применений.

Из литературных источников следует, что кристаллический  $FeIn_2Se_4$  можно получать в виде пленок вакуумным испарением [1, 2] или тонких пластин методом химических транспортных реакций [3]. На основе таких кристаллов создавались барьеры Шоттки и анализировались их диодные свойства. В настоящей работе методом Бриджмена были получены магнитные кристаллы  $FeIn_2Se_4$  и исследованы свойства гетероперехода с ван-дер-ваальсовским контактом на гетерогранице.

### Эксперимент

Крупные слитки кристаллов  $FeIn_2Se_4$  разрезали на шайбы, а затем из них вырезали подложки по плоскостям спайности слоев. Поверхность сколотых пластин была зеркальной и пригодной для создания гетероперехода (ГП) методом ван-дер-ваальсовского контакта [4]. Из эффекта Холла установлено, что выращенные кристаллы имеют  $p$ -тип проводимости. Концентрация основных носителей тока и холловская подвижность вдоль слоев составляют соответственно  $p=(2...3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $\mu_H=10 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

В качестве второго компонента ГП были выбраны кристаллы  $n-InSe$ , также выращенные методом Бриджмена. Использовали как нелегированные ( $n=3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), так и легированные примесью германия ( $n=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) кристаллы. Они служили фронтальным полупроводником и поэтому скалывались со слитка толщиной в 20—50 мкм.

Вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики ГП исследовали на установке „Schlumberger SI 1255” с компьютерным интерфейсом. Кроме измерений, проводимых при комнатной температуре, исследовали также температурные зависимости ВАХ с целью установления механизма протекания тока через ГП.

Спектры fotocувствительности изготовленных ГП получали с помощью монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Все спек-

тры нормировались относительно количества падающих фотонов.

**Результаты исследований и их обсуждение**

Из исследований ВФХ ГП следует, что распределение примесей на гетерогранице имеет резкий характер. Этому соответствует линейная зависимость  $C^{-2}$  от  $U$  при обратных смещениях ГП. При измерениях ВФХ обнаруживают частотную зависимость. Эти частотные зависимости тем больше различаются между собой, чем больше последовательное сопротивление ГП. Для ГП с низкоомным InSe ВФХ практически не испытывают частотной зависимости. Величина потенциального барьера ГП ( $\Phi_b$ ), определенного из ВФХ, составила для различных образцов 0,42—0,52 эВ.

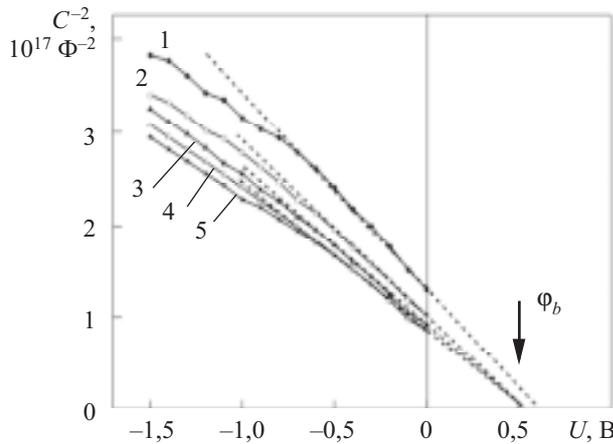


Рис. 1. ВФХ ГП  $n\text{-InSe-p-FeIn}_2\text{Se}_4$  при различных частотах: 1 — 30 кГц; 2 — 20; 3 — 15; 4 — 10; 5 — 5 кГц

На рис. 1 показаны ВФХ гетероперехода  $n\text{-InSe-p-FeIn}_2\text{Se}_4$  с низкоомным фронтальным слоем. Для кривых 2—5 продолжение  $C^{-2}-U$ -зависимости до пересечения с осью напряжений дает одну и ту же величину напряжения отсечки, которая соответствует величине потенциального барьера ГП [5, с. 69]:

$$C^{-2} = \frac{2(\epsilon_1 N_{D_1} + \epsilon_2 N_{A_2})(U_b - U)}{q N_{D_1} N_{A_2} \epsilon_1 \epsilon_2}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_1, \epsilon_2$  — диэлектрическая проницаемость полупроводников, образующих ГП;  
 $N_{D_1}, N_{A_2}$  — концентрация доноров и акцепторов, соответственно;  
 $q$  — заряд электрона.

Обеднение основными носителями на  $p-n$ -переходе из-за приблизительно равной их концентрации может осуществляться в обоих полупроводниках.

ВАХ гетероперехода имеет ярко выраженный диодный характер (рис. 2). Для установления механизма прохождения тока через барьер необходимо было провести температурные измерения прямых ветвей ВАХ ГП, из которых определялся диодный коэффициент  $n$  [5, с. 55]:

$$J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

где  $J_0$  — плотность тока насыщения;  
 $k$  — постоянная Больцмана;  
 $T$  — абсолютная температура.

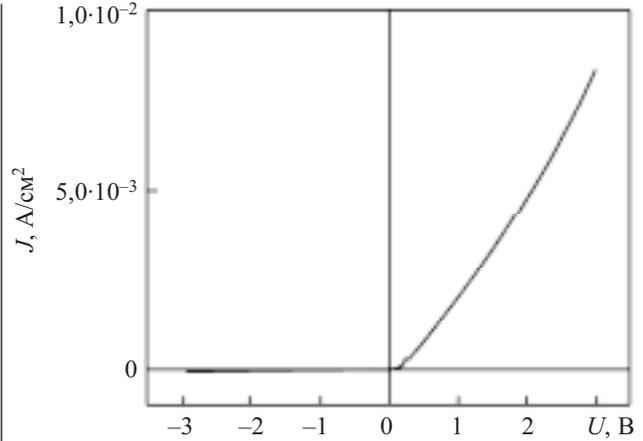


Рис. 2. ВАХ ГП  $n\text{-InSe-p-FeIn}_2\text{Se}_4$  при комнатной температуре

Такие ВАХ были измерены в диапазоне температур 233—323 К с интервалом в 30 К и показаны на рис. 3 в полулогарифмических координатах для получения линейной связи между током и напряжением

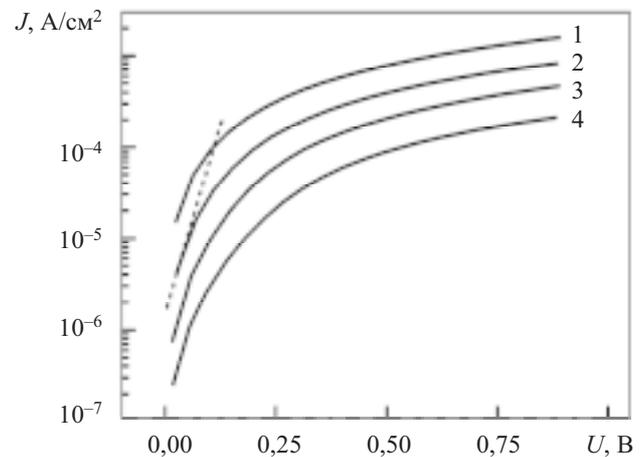


Рис. 3. Температурные зависимости ВАХ ГП  $n\text{-InSe-p-FeIn}_2\text{Se}_4$ : 1 — 323 К; 2 — 291 К; 3 — 262 К; 4 — 233 К. Пунктирная кривая — теоретическая ВАХ при комнатной температуре

ем. Там же показана теоретическая зависимость ВАХ при комнатной температуре. Хорошо видно, что уже при малых прямых смещениях ВАХ сильно отклоняются от линейной зависимости. Это вызвано перераспределением падения приложенного напряжения между обедненной областью и последовательным сопротивлением, которое включает в себя все квазинейтральные области ГП. Аналогичные отклонения ВАХ наблюдаются практически во всех исследуемых диодах [6, с. 99]. О влиянии последовательного сопротивления свидетельствует также факт, что с понижением температуры отклонение ВАХ от линейного закона возрастает, т. к. сопротивление квазинейтральных областей увеличивается. Диодный коэффициент ВАХ при токах до  $2 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup> близок к единице. В этом случае имеет место диффузионный механизм прохождения тока через ГП.

На рис. 4 показаны спектральные зависимости квантовой эффективности фототока ГП  $n\text{-InSe-p-FeIn}_2\text{Se}_4$  при комнатной температуре.

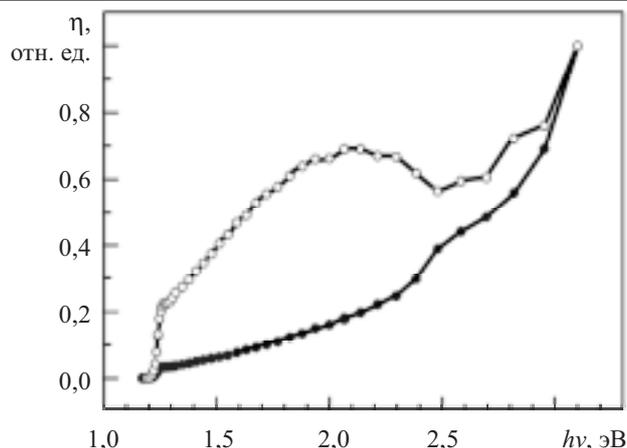


Рис. 4. Спектры квантовой эффективности фототока двух образцов ГП *n*-InSe-*p*-FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> при комнатной температуре

Образцы ГП содержали слой нелегированного InSe различной удельной проводимости. Значения ширины запрещенной зоны InSe и FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> практически мало отличаются друг от друга при  $T=295$  К:  $E_g(\text{InSe})=1,25$  эВ,  $E_g(\text{FeIn}_2\text{Se}_4)=1,15$  эВ.

Фототок измеряли в режиме тока короткого замыкания. Спектр имеет длинноволновый порог фоточувствительности при 1,25 эВ. Это указывает на то, что вся обедненная область ГП и разделение фотоносителей происходит только во фронтальном полупроводнике.

Роль базового полупроводника состоит в создании контактной разницы потенциалов между двумя полупроводниками. Поглощение света приповерхно-

стной областью и диффузия носителей к границе *p*-*n*-перехода обеспечивают фотоотклик ГП в ультрафиолетовой области спектра.

**Выводы**

Выращенные методом Бриджмена кристаллы FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> имели слоистую структуру и качественную зеркальную поверхность скола. Методом ван-дер-ваальсовского контакта с другим слоистым полупроводником (InSe) созданы гетеропереходы *n*-InSe-*p*-FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub>. Измеренные электрические характеристики (ВФХ, ВАХ и температурные зависимости ВАХ) свидетельствуют об удовлетворительном качестве полученных ГП. Полученные гетеропереходы обладают широким спектром фоточувствительности, ограниченным только с длинноволновой стороны.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Niftiev N. N., Alidzanov M. A., Tagiev O. B., Muradov M. B. Electrical properties of FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> single crystals // Semiconductors.— 2003.— Vol. 37, N 2.— P. 165—167.
2. Niftiev N. N., Alidzhanov M. A., Tagiev O. B. et al. Electrical properties of MnIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> // Ibid.— 2004.— Vol. 38, N 5.— P. 550—551.
3. Torres T., Sagredo V., de Chalbaud L.M. et al. Magnetic and structural characterization of the semiconductor FeIn<sub>2</sub>Se<sub>4</sub> // Physica B: Condensed Matter.— 2006.— Vol. 384, N 1–2.— P. 100—102.
4. Бакуменко В. Л., Чишко В. Ф. Электрические свойства оптических контактов слоистых полупроводников // Физ. и техн. полупроводн.— 1977.— Т. 11, № 10.— С. 2000—2002.
5. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник.— М.: Мир, 1975.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Кн. 1.— М.: Мир, 1984.

**НОВЫЕ КНИГИ**

НОВЫЕ КНИГИ



**Мишин Г. Т. Современная аналоговая микроэлектроника: Теория и практика.— М.: Радиотехника, 2007.— 208 с.**

Изложены естественнонаучные представления аналоговой микроэлектроники, основой которых являются математическая теория дифференциальных уравнений и систем дифференциальных уравнений в обобщенной форме. Впервые показано, что полномасштабный переход к естественнонаучным представлениям позволяет сформировать новый элементный базис; предложить решения для матричных аналоговых больших интегральных микросхем и перепрограммируемых аналоговых интегральных схем; обосновать процедуру синтеза аналоговых электронных цепей. Теоретические выводы сопровождаются практическими примерами. Предназначена для инженеров, аспирантов и студентов, занимающихся исследованием и разработкой аналоговых систем электроники.

НОВЫЕ КНИГИ



**Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения.— М.: Университетск. книга, 2007.— 192 с.**

Излагаются принципы построения оптико-электронных систем с матричными приемниками излучения, работающих в двух и более спектральных диапазонах. Описываются основные узлы таких систем: оптические системы выделения рабочих спектральных диапазонов; матричные двух- и многодиапазонные (многоспектральные) приемники излучения; системы объединения изображений, получаемых в различных спектральных диапазонах. Приводятся примеры использования двух- и многодиапазонных оптико-электронных систем в различных областях науки, техники, народного хозяйства, в военном деле. Для разработчиков и потребителей оптико-электронных средств и методов. Может использоваться в учебном процессе высших и средних специальных учебных заведений по направлениям в области оптотехники, фотоники и оптоинформатики.