

## КРИСТАЛЛОФИЗИКА НИЗКОРАЗМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Э.М. КЕРИМОВА, С.Н. МУСТАФАЕВА

*Институт Физики АН Азербайджана,  
370143, г. Баку, пр. Г. Джавида, 33*

Разработаны режимы синтеза и технология выращивания слоисто-цепочечных монокристаллов типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$ .

Изучены электрофизические свойства полученных низкоразмерных полупроводников и влияние на них различных внешних факторов. На основе полученных полупроводников предложены эффективные приемники видимого и ИК-излучения, нейтронные детекторы, тензо- и пьезофоторезисторы.

Поиск новых полупроводниковых кристаллических материалов, используемых для нужд электронной техники, является одной из основных задач кристаллофизики.

На протяжении многих лет в лаборатории "Кристаллофизики" проводятся работы по разработке режимов синтеза и технологии выращивания слоисто-цепочечных монокристаллов типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  (A-Tl, B-In, Ga, Ag, Cu, Co, Mn, Ni, Fe, Sb, PЗЭ; C - S, Se, Te).

Разработаны технологические и кристаллохимические аспекты синтеза и выращивания низкоразмерных халькогенидов с участием элементов ШБ подгруппы, PЗЭ и переходных металлов, а также твердых растворов на их основе [1-3]. Разработаны оптимальные режимы интеркалирования ионами лития слоисто-цепочечных полупроводников типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  тянущим электрическим полем из раствора специально разработанного электролита [4].

Нами проводится изучение физических свойств (электрических, фотоэлектрических, оптических, тепловых, рентген дозиметрических) полученных низкоразмерных полупроводников под воздействием различных внешних факторов (ионизирующие излучения, электрические и магнитные поля, температура и давление).

Была собрана установка для комплексных исследований оптических и фотоэлектрических спектров полупроводниковых кристаллов методами модуляционной спектроскопии. В основу этой установки входит комплекс спектральный вычислительный универсальный КСВУ-6М, позволяющий полностью автоматизировать процессы записи и математической обработки спектров. Широкий температурный диапазон исследований достигается при помощи гелиевого оптического криостата типа УТ-РЕКС. Дополнительные приспособления, разработанные нами, позволяют измерять  $\lambda$ -модуляционные, пьезомодуляционные и электромуляционные оптические и фотоэлектрические спектры. Установка позволяет также производить одновременную запись самого спектра, его 1-ой и 2-ой производных.

Исследованием влияния интеркаляции, температуры и деформации на спектры экситонного поглощения монокристаллов типа  $A^{III}B^{III}C_2^{VI}$  установлено, что температурная зависимость максимума экситонной полосы поглощения в этих соединениях имеет сложный характер. В частности, для  $TlGaS_2$  температурный коэффициент зависимости основного состояния прямого экситона имеет положительный знак, в то время как для  $TlGaSe_2$  - отрицательный; при этом температурный и барический коэффициенты сдвига в них претерпевают скачкообразные

изменения при структурнофазовых перестройках, характерных для кристаллов этого типа. Интеркаляция литием монокристалла  $TlGaSe_2$  приводит к смещению экситонного пика  $E_{EX}^I$  в сторону малых энергий во всем изученном интервале температур; уменьшается также по абсолютной величине коэффициент температурного сдвига, причем в областях  $T \leq 20K$  и  $90K \leq T \leq 110K$  это изменение происходит скачкообразно. Вторая, низкоэнергетическая полоса экситонного поглощения  $E_{EX}^{II}$ , наблюдаемая при  $T \leq 120K$ , с понижением температуры смещается в сторону больших энергий, а величина  $\partial E_{EX}^{II} / \partial T$  претерпевает скачки при температурах около 90, 50 и 20 K [5].

Анализ результатов изучения влияния состава твердых растворов  $Tl(InS_2)_{1-x}(FeSe_2)_x$  ( $0 \leq x \leq 0,015$ ) на их физические свойства показал, что по мере увеличения  $x$  ширина запрещенной зоны и энергия экситонного пика линейно увеличиваются, рентгенопроводимость увеличивается в 2÷3 раза, а температуры фазовых переходов заметно смешаются в сторону низких температур [6]. Исследованы спектры поглощения экситонной люминесценции и комбинационного рассеяния (КР) света в монокристаллах  $TlGaS_2$  при температуре 1,8 K. Обнаружена многополосная фотолуминесценция в области 2,48-2,54 эВ, обусловленная излучательной рекомбинацией непрямого экситона с эмиссией фононов. Найдены энергетические положения прямого (2,606 эВ) и непрямого (2,540 эВ) экситонов и их энергии [7].

В результате исследования  $\lambda$ -модуляционных фотоэлектрических спектров монокристаллов  $TlGa_{1-x}Fe_xS$  в области экситонного поглощения установлено, что замещение  $Ga \rightarrow Fe$  (1-2 ат.%) приводит к существенному сдвигу экситонной полосы; при увеличении концентрации Fe экситонный пик на краю поглощения исчезает. Последнее связывается с сильным изменением межслоевых связей в монокристалле [8].

Анализ результатов изучения влияния частичного замещения атомов индия железом в монокристаллах  $TlIn_{1-x}Fe_xS_2$  ( $x=0 \div 0,01$ ) на их физические свойства показал, что по мере увеличения  $x$  длинноволновой край фотопроводимости смещается в сторону более длинных волн от 1,5 до 1,1 эВ (826 нм до 1127 нм), фононный спектр в области частот  $250 \div 350 \text{ см}^{-1}$  перестраивается, а температура сегнетоэлектрического фазового перехода смещается в сторону низких температур (с 200 до 185 K) [9,10].

Изучены особенности рентгенопроводимости и рентгендозиметрических характеристик монокристаллов типа  $A^3B^6$ ,  $A^3B^3C_2^6$  и их твердых растворов

$Tl(GaSe_2)_{1-x}(InSe_2)_x$ ;  $Tl(InS_2)_{1-x}(FeSe_2)_x$ ;  $TlGa_{1-x}Fe_xS_2$ . Выявлены перспективы их практического использования в качестве активных элементов для детекторов рентгеновского излучения [11].

На основе экспериментальных измерений выявлено, что монокристаллы  $TlGaSe_2$  проявляют высокую рентгеночувствительность при всех фиксированных значениях ускоряющего потенциала в области 25-50 кэВ и "эффективной жесткости" излучения; зависимость рентгенопроводимости от интенсивности дозы ( $E$ ) носит степенной характер:  $\Delta\delta_{E,0} \sim E^{0,5+1}$ .

Проведены экспериментальные исследования влияния жестких излучений на фотоэлектрические свойства трехкомпонентных полупроводников типа  $A^3B^3C_2^6$  ( $TlInSe_2$ ,  $TlGaSe_2$ ) и фотодиодов на их основе.

Исследовалось влияние предварительного гамма (источник кобальт-60) ( $10^4$ - $10^8$ Р), импульсного нейтронного с энергией  $E \geq 0,1$  Мэв ( $\Phi = 10^{12}$ - $10^{14}$  н/см<sup>2</sup>) и электронного с энергиями 6 и 25 Мэв ( $\Phi = 10^{13}$ - $10^{16}$  э/см<sup>2</sup>) облучений на спектральные характеристики и интегральную фоточувствительность монокристаллов  $TlGaSe_2$ ,  $TlInSe_2$  р-типа проводимости и фоточувствительных структур на их основе [12].

Выявлено, что в результате облучения нейтронами до  $5 \cdot 10^{13}$  н/см<sup>2</sup> элементов на основе  $TlGaSe_2$  фоточувствительность в максимуме спектральной характеристики (0,56-0,58 мкм) практически не меняется, одновременно наблюдается незначительное увеличение фоточувствительности в примесной области до 1,2 мкм. В отличие от указанной области в диапазоне более коротких волн (0,34-0,55 мкм) изменение спектральной фоточувствительности вследствие указанного нейтронного облучения носит обратный характер. Величина интегральной фоточувствительности (к источнику "А") монокристаллов  $TlGaSe_2$  под действием нейтронного (до  $5 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>) и гамма-облучения (до  $10^8$  р) при прочих равных условиях зависит от величины приложенного напряжения.

В кристаллах  $TlInSe_2$  обнаружен акустофотовольтаический эффект, заключающийся в наличии управляемой звуком э.д.с. в направлении распространения продольных звуковых волн вдоль тетрагональной оси (001) [13].

Установлено, что за счет интеркалирования монокристаллов типа  $A^3B^3C_2^6$  литием можно управлять электропроводностью вдоль С-направления кристалла, увеличивать степень анизотропии. Введение ионов лития в межслоевые или межцепочечные пространства этих кристаллов способствует увеличению фоточувствительности, рентгеночувствительности, а также расширяет спектральный диапазон чувствительности указанных кристаллов. Интеркалирование литием приводит к замедлению кинетики фототока в кристаллах, а также к образованию в образцах внутренней э.д.с., управляемой различными длинами волн видимого диапазона [4, 14-17].

В широком диапазоне температур (300÷900К) исследованы электрофизические свойства тройных соединений со слоистой и цепочечной структурой  $TlInC_2^6$ (С-S;Se,Te). Выявлено, что доминирующим механизмом рассеяния относительно тока в них является рассеяние на акустических колебаниях решетки. На основе стандартной модели зонного спектра определены основные характеристические параметры: эффективная масса, плотность состояний носителей, отношение подвижностей, температурный коэффициент ширины запрещенной зоны [18,19].

Исследованием явлений переноса тепла при различных температурах (77-650 К) в монокристаллах  $TlInC_2^6$  установлено, что основным механизмом рассеяния фононов являются трехфононные процессы.

На основе полученных низкоразмерных полупроводников типа  $A^3B^3C_2^6$  предложены эффективные приемники видимого и ИК-излучения, детекторы рентгеновского и гамма-излучения, нейтронные детекторы, тензо- и пьезофоторезисторы [11, 12, 16, 20].

[1] G.D. Guseinov, A.M. Ramazanade, E.M. Kerimova, M.Z. Ismailov. Phys. Stat. Sol., 1967, v.22, №1, p.K117-K122.  
 [2] G.D. Guseinov, E. Mooser, E. Kerimova et. al. Phys. Stat. Sol. 1969, v.34, p.33-44.  
 [3] G.D. Guseinov, G.G. Guseinov, E.M. Kerimova et. al. Materials Research Bulletin. 1978, v.13, p.975-982.  
 [4] С.Н. Мустафаева. Неорганические материалы. 1994, т.30, №8, с. 1033-1036.  
 [5] E.M. Kerimova, S.N. Mustafaeva, N.Z. Gasanov. 10th International Conference on ternary and Multinary Compounds ICTMC-10 Stuttgart. Sept. 1995, 19-22, p.11-30.  
 [6] Э.М. Керимова, Г.Г. Гусейнов, Л.Ф. Исмаиладзе, Ф.К. Заманова. Неорганические материалы. 1997, т.33, №9, с.1060-1062.  
 [7] E.M. Kerimova, S.G. Abdullaeva, S.N. Mustafaeva, S.I. Mekhtiyeva. Materials of the Intern. Conf. on Luminescence. Prague. Carles University. 19-20 August, 1996, Czech Republic.  
 [8] Э.М. Керимова, С.Б. Кязимов, Р.Н. Керимов. Тез. докл. 7-го Международного научного семинара "Фи-

зика магнитных явлений" г. Донецк, 23 мая, 1994, Украина.  
 [9] Э.М. Керимова, С.Н. Мустафаева, Л.А. Исмаиладзе и др. Fizika, 1998, т.4, №1, с.28-29.  
 [10] Э.М. Керимова, С.Н. Мустафаева, П.Г. Исмаилова и др. Материалы 1-ой Респ. научн. конф. "Актуальные проблемы физики". Баку, БГУ им. М. Расулзаде, 5-6 февр., 1998, с. 255-256.  
 [11] Э.М. Керимова, С.Н. Мустафаева, Ф.М. Сеидов. Fizika, 1998, т.4, №3.  
 [12] A.Z. Abasova, E.M. Kerimova, G.A. Muradova, A.M. Pashayev. Inst. Phys. Conf. ser. №152: Section H: Single cristal and thin film Devices. 1998, IOP Publishing Ltd., p.983-988.  
 [13] Г.Д. Гусейнов, Г.Б. Абдуллаев, Э.М. Керимов и др. Тез. докл. на VIII научно-техническом совещании по фотоэлектрическим полупроводниковым приемникам излучения. Москва. Секция X, 1978, с. 67.  
 [14] С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов, В.А. Рамазанзаде. Неорган. материалы. 1995, т.31. №3. с.318-320.  
 [15] С.Н. Мустафаева, М.М. Асадов. Неорган. материалы. 1997, т.33, №7, с.790-792.

- [16] *S.N. Mustafaeva, M.M. Asadov, V.A. Ramazanade.* Materials of the 11th International Conference on ternary and multinary compounds. ICTMC-11, Salford, United Kingdom. Department of Physics, University of Salford 8-12 th September 1997, p.p1-71.
- [17] *C.H. Mустафаева, Э.М. Керимова, Н.З. Гасанов.* ФТП., 1998, т.32, №2, с.145-147.
- [18] *Э.М. Керимова, Г.Д. Гусейнов, С.Д. Мамедбейли и др.* Неорган. материалы. 1989, т.25, с.1392-1394.
- [19] *Э.М. Керимова, Г.Д. Гусейнов, С.М. Бидзинова.* Пре-принт №3, ИФАН Аз. Респ., Баку, 1991, с.20.
- [20] *Э.М. Керимова, С.Д. Мамедбейли, А.З. Аббасова, П.Г. Исмаилова.* Fizika. 1996, т.2, №2, с.30-33.

**Э.М. Кәримова, S.N. Mustafayeva**

## **KIÇIK ÖLÇÜLÜ YARIMKEÇİRİCİLƏRİN KRİSTALLOFİZİKASI**

$A^3B^3C_2^6$  tipli laylı-zəncirvari monokristalların alınma rejimi və texnologiyası işlənmişdir. Alınmış monokristalların elektrofiziki xassələri, onlara xarici amillərin tə'siri öyrənilmişdir.

Alınmış  $A^3B^3C_2^6$  tipli kiçik ölçülü yarımkeçiricilərdən müxtəlif şualarını qeyd edən effektiv detektorlar, görünən, infraqırmızı şuaları qəbul edən çeviricilər və həmin kristallar əsasında müxtəlif cihazlar təklif olunmuşdur.

**E.M. Kerimova, S.N. Mustafayeva**

## **THE CRYSTALOPHYSICS OF LOW-DIMENTIONAL SEMICONDUCTORS**

The synthesis regimes and technology of growth of layer and chain  $A^3B^3C_2^6$  - type single crystals have been elaborated. Electrophysical properties of obtained low-dimentional semiconductors have been investigated.

The influence of external effects on physical properties of these crystals have been studied. The effective receivers of visible and infrared light, various ray-detectors and piesophotoreistors have been proposed on the base of obtained low-dimentional  $A^3B^3C_2^6$  semiconductors.