

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 λ -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 λ -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/см²) и электронного с энергиями 6 и 25 Мэв ($\Phi = 10^{13}$ - 10^{16} э/см²) 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/см² 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/см²) 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. Charles 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 crystal 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.* Препринт №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.