

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
НА ОСНОВЕ СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ ТИПА A^3B^6 *А.Г.КЯЗЫМ-ЗАДЕ, В.М.САЛМАНОВ, А.З.АБАСОВА,
Л.Г.ГАСАНОВА, С.А.ДЖАХАНГИРОВА, В.В.ДАДАШОВА

Бакинский Государственный Университет

*bsu_aydin@yahoo.com

В работе рассматривается возможность изготовления различных функциональных элементов, таких как координатно-чувствительных фотоэлементов, сэндвич фоторезисторов с управляемым спектром чувствительности, быстродействующих S-диодов с памятью, фототриггеров и электролюминесцентных переключателей на основе монокристаллов слоистых соединений типа A^3B^6 , а также гетеропереходов в системе $InSe-GaS_xSe_{1-x}$. Приводятся некоторые основные характеристики и обобщенные экспериментальные результаты исследования указанных элементов. Кратко анализируются механизмы возникновения явлений, лежащих в основе принципа работы указанных элементов.

Известно, что в монокристаллах слоистых соединений типа A^3B^6 наблюдается высокая фоточувствительность, некоторые эффекты электрической неустойчивости, электролюминесценция в видимой и близкой ИК-области спектра, а также некоторые особенности оптических явлений. Это позволяет изготовить на их основе многофункциональные элементы, такие как, управляемые оптические фильтры лазерного света, быстродействующие S-диоды с памятью, электролюминесцентные переключатели, фототриггеры, координатно-чувствительные фотоэлементы, приемники в терагерцовой области спектра и т.д. Это расширяет область применимости указанных кристаллов [1-2] и привлекает интерес исследователей к этим соединениям. С другой стороны возможность получения твердых растворов и создания диодных структур на их основе позволяет расширить функциональные возможности и рабочий диапазон указанных элементов [3-7].

В данной работе сообщаются некоторые обобщенные результаты исследования свойств «сэндвич» фоторезисторов, фототриггеров, электролюминесцентных переключателей, координатно-чувствительных фотоэлементов на основе указанных монокристаллов и диодных структур на их основе.

1. Исследованные монокристаллы выращивались методом медленного охлаждения при постоянном градиенте температур. Полученных кристаллы обладали p-тип проводимостью для всех составов твердых растворов GaS_xSe_{1-x} и n-тип проводимостью для InSe. Концентрация носителей тока составляла 10^{12} -

10^{13} см^{-3} для $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ и $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$ для InSe . Образцы в виде прямоугольных параллелепипедов, вырезались из крупных монокристаллов. Поперечные размеры образцов с толщиной 50-200 мкм варьировались в интервале 8-20 мм². Металлические контакты омического характера изготовлены припайванием индия или сделаны из эвтектического сплава In-Ga. Освещение образцов осуществлялось излучением лампы накаливания, прошедшего через монохроматор типа ЗМР-3, а также излучением неодимового и рубинового лазера, работающего в режиме модуляции добротности. Спектры излучения регистрировались фотоумножителями ФЭУ-17а и ФЭУ-22, область чувствительности которых охватывает интервал длин волн от 400 до 1000 нм. Гетеропереходы (ГП) в системе $\text{InSe} - \text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ были изготовлены методом посадки на оптический контакт [5]. Для измерения фоточувствительности в продольном режиме поверхности ГП были снабжены двумя омическими контактами со стороны $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ и одним управляющим электродом со стороны InSe . При исследовании координатно-чувствительных фотоэлементов, измерения проводились с использованием светового зонда, изготовленного на базе микроскопа. Положение светового зонда менялось микрометрическим винтом.

2. Исследование электрических и фотоэлектрических свойств показало, что граница раздела изученных ГП $\text{InSe} - \text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ является достаточно совершенной и особенности энергетической зонной диаграммы способствует эффективному разделению неравновесных носителей контактным полем ГП. Вследствие этого наблюдается высокая фоточувствительность в схеме, использующей эффект окна, когда ГП освещается со стороны широкозонного слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. Установлено, что при этом спектральные распределения фоточувствительности исследованных ГП охватывают широкий диапазон энергии, заключенных между ширинами запрещенных зон контактирующих материалов. Красная граница спектра соответствует ширине запрещенной зоны монокристаллов InSe ($E_g=1,2 \text{ эВ}$) для непрямых переходов, а коротковолновая граница спектра ограничивается областью сильного поглощения монокристаллов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ ($E_g=2,042,62 \text{ эВ}$). При этом свет поглощается на передней поверхности монокристаллов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ и из-за малой диффузионной длины неосновных носителей в слоистых кристаллах они не доходят до области перехода и не происходит разделения фотоносителей между фазами.

3. Исследование фотоэлектрических свойств одиночных ГП в системе $\text{InSe}-\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$, показало, что эта система может быть использована для изготовления координатно-чувствительных фотоэлементов, работающих в видимой и ближней ИК области спектра. Известно, что основной характеристикой координатно-чувствительных фотоэлементов является зависимость продольного фотонапряжения от положения светового зонда. Как было установлено экспериментально, при освещении структуры световым зондом на расстоянии x от центра, возникает продольное фотонапряжение V_ϕ между контактами к базе, величина и знак которого зависит от x . На рис.1 показаны зависимости V_ϕ от координаты x при различных значениях состава твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ при 300К. Как видно из рисунка, во всех исследованных структурах продольное фотонапряжение меняется линейно с

изменением координаты вплоть до области контактов и меняет свой знак при переходе светового зонда через середину базы.

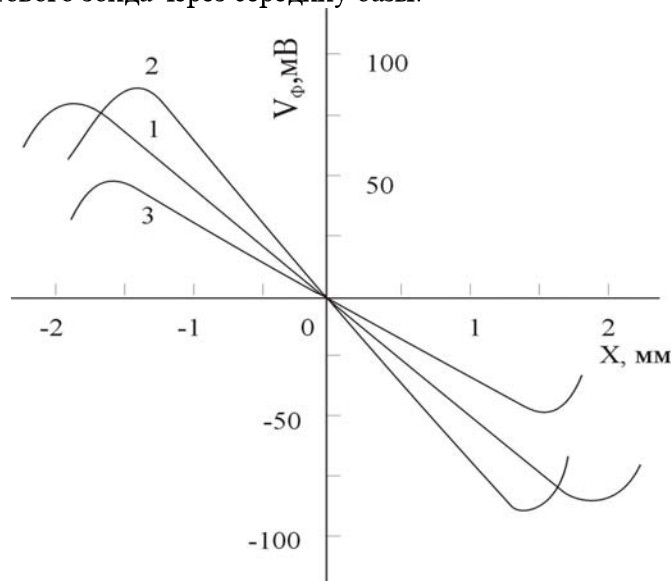


Рис. 1. Зависимости продольного фотонапряжения от координаты в ГП InSe – GaS_xSe_{1-x} при 300 К. x: 1 – 0; 2 – 0,3; 3 – 0,6.

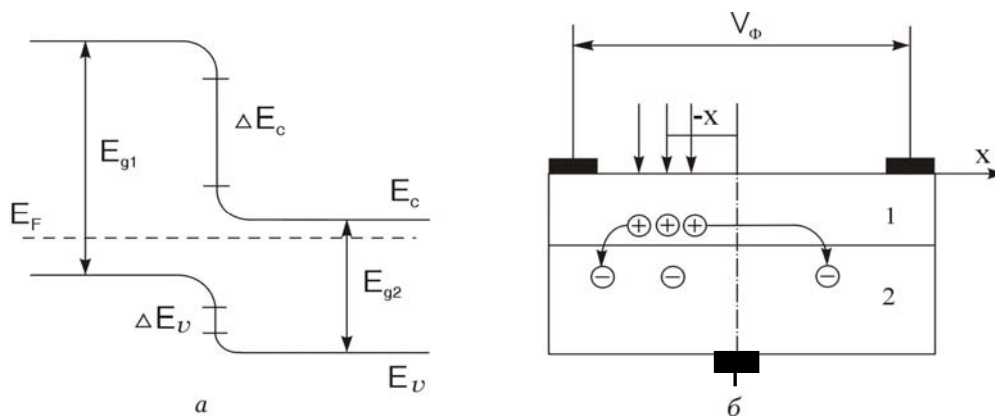


Рис. 2. Энергетическая зонная диаграмма (а) и схема движения неравновесных носителей заряда (б) при освещении структуры световым зондом. 1 – p- GaS_xSe_{1-x}; 2 – n- InSe.

На рис.2 показана энергетическая зонная диаграмма и схематическое изображение исследованной структуры, а также схема движения неравновесных носителей заряда при освещении структуры световым зондом. Согласно [8] при этом величина V_ϕ определяется соотношением $V_\phi = 2i_y\rho x$, где $i_y = i_1 + i_2 = i_0(\exp(e\phi/\beta kT) - 1)$ - ток утечки через запорный слой, ρ - сопротивление слоя GaS_xSe_{1-x} на единицу длины, i_0 – ток насыщения, ϕ - величина вентильной фотоэдс при данном уровне освещения, β - коэффициент неидеальности перехода. Как видно из приведенной формулы, малая величина i_y определяет

низкую продольную фоточувствительность для широкозонных материалов. Однако величина V_{ϕ} может быть существенно повышена благодаря большому сопротивлению верхнего слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности расширения спектральной чувствительности биполярных координатно-чувствительных фотоэлементов на основе ГП $\text{InSe} - \text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ в видимой области спектра с заменой GaSe монокристаллами твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$.

4. Показана возможность изготовления «сэндвич» фоторезисторов на основе ГП в системе $\text{InSe-GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ с управляемым диапазоном спектральной чувствительностью. На основе проведенных исследований установлено, что величина фотопроводимости в области поглощения света монокристаллами InSe управляется варьированием толщины слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ и прикладыванием поперечного смещения к ГП.

Для исследования фотопроводимости в продольном режиме слои $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ были снабжены двумя омическими контактами (контакты к базе), а InSe – одним управляющим контактом (рис. 2б). Как было установлено, в продольном режиме измерения становится возможным управление диапазоном спектральной фоточувствительности ГП поперечным электрическим полем и варьированием толщины слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. Поэтому измерения проводились в двух случаях. В первом случае поперечное напряжение не прикладывается и измеряется фотопроводимость между контактами к базе, во втором случае изучается влияние поперечного электрического поля на величину и спектр фотопроводимости между контактами к базе.

Как уже было отмечено, спектр фоточувствительности в первом случае значительно зависит от толщины слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. Если толщина слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ значительно больше, чем толщина слоя объемного заряда ($d \gg L$), фоточувствительность между контактами к базе при освещении со стороны $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ определяется лишь поглощением света в этом слое и ее спектральное распределение коррелируется со спектром фоточувствительности монокристаллов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ (рис.3, кривая 1). Однако при $d \geq L$ появляется заметная фоточувствительность и в области поглощения монокристаллов InSe (рис.3, кривые 2 и 3), величина которой резко растет с уменьшением толщины слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. По-видимому, это связано с модуляцией толщины квазинейтральной области слоя $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$ вблизи перехода при освещении, которая происходит за счет экранирования объемного заряда неравновесными фотодырками, инжектированными из InSe .

При освещении структуры со стороны InSe фоточувствительность между контактами к базе либо не наблюдается (если $d \gg L$ для слоя InSe), либо наблюдается (если $d \geq L$) лишь в области спектра, соответствующей близкой окрестности края поглощения монокристаллов InSe . По-видимому, когда энергия кванта света $h\nu \gg 1.2$ эВ, свет поглощается в основном на поверхности слоя InSe , а возникающие неосновные фотоносители не доходят до области ГП. Поэтому наблюдается резкое уменьшение фоточувствительности в коротковолновой области спектра.

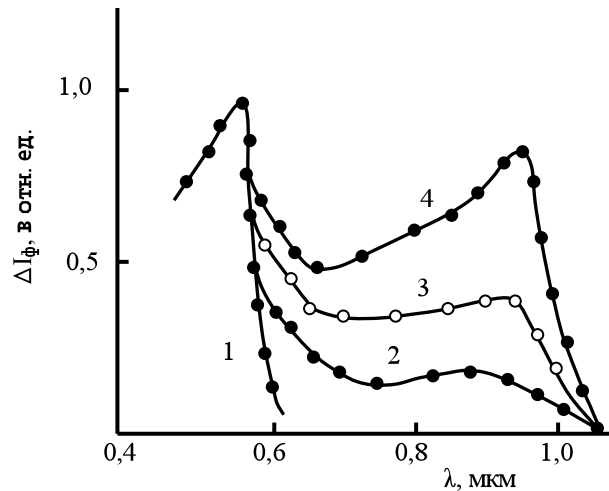


Рис.3. Спектральное распределение продольной фотопроводимости в ГП InSe - GaS_{0,2}Se_{0,8}. Толщина слоя GaS_{0,2}Se_{0,8} уменьшается с ростом номера кривых.

При отсутствии поперечного смещения слои InSe отделены высоким сопротивлением от слоя GaS_xSe_{1-x}. Поэтому в случае толстых слоев GaS_xSe_{1-x} не наблюдается заметной фоточувствительности в области поглощения света монокристаллами InSe, при освещении структуры со стороны GaS_xSe_{1-x}. Однако форма спектра фоточувствительности при этом сильно меняется при приложении к ГП поперечного смещения в пропускном и обратном направлении. В обоих случаях появляется заметная фоточувствительность и в области поглощения света монокристаллами InSe при освещении структуры со стороны GaS_xSe_{1-x}. Причем фоточувствительность в этой области спектра резко увеличивается с ростом приложенного к ГП напряжения смещения. По-видимому, при наличии смещения в пропускном направлении это связано со спрямлением энергетических зон вблизи перехода под действием смещения, вследствие чего сопротивление перехода уменьшается и рассмотренная структура представляет собой систему, состоящую из параллельно соединенных фотосопротивлений из InSe и GaS_xSe_{1-x}. При этом в области поглощения InSe фотопроводимость экспоненциально растет в зависимости от прямого смещения при относительно низких значениях последнего, что еще раз свидетельствует о связи фоточувствительности в указанной области спектра с уменьшением сопротивления перехода. А появление фоточувствительности в указанной области спектра при наличии смещения в обратном направлении, по-видимому, связано с расширением области объемного заряда со стороны высокоомного слоя GaS_xSe_{1-x} под действием обратного смещения и уменьшением высоты и толщины этого слоя при освещении.

5. Исследовано влияние света из области $\lambda=0,4 - 3,0$ мкм на параметры S-диодов на основе монокристаллов твердых растворов GaS_xSe_{1-x}. Установлено, что в симметричных структурах металл-слоистый полупроводник-металл, изготовленных на основе указанных монокристаллов, наблюдается быстродействующий эффект переключения с длительной электрической

памятью и фототриггерный эффект под действием света из области собственного поглощения.

Анализ ВАХ показывает, что при относительно слабых полях они подчиняются закону Ома. Начиная с некоторой напряженности, линейность ВАХ нарушается и при напряженностях электрического поля $E \approx 10^4 \div 10^5$ В/см, образцы скачком переходят из высокоомного состояния в низкоомное состояние (рис. 4, кривая 1). При этом сопротивление образца уменьшается на несколько порядков. Аналогичные ВАХ наблюдаются во всех исследованных твердых растворах, а также в ГП $\text{InSe} - \text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. В образцах с одинаковой толщиной напряжение срыва увеличивается с ростом концентрации атомов серы в твердых растворах. Кроме этого установлено, что напряжение срыва уменьшается с ростом температуры. При приложении синусоидального и прямоугольного импульсного поля напряжение срыва уменьшается с ростом частоты и длительности импульса. Переключение является запоминающимся и мгновенным. Время переключения, которое оценено в импульсном режиме, оказалось не больше, чем $\sim 10^{-8}$ с. Исходное высокоомное состояние восстанавливается прикладыванием кратковременного импульса напряжения с порядком напряжения срыва или нагреванием образца до комнатной температуры с последующим погружением в жидкий азот. На основе анализа экспериментальных результатов установлено, что причиной эффекта переключения является двойная инжекция.

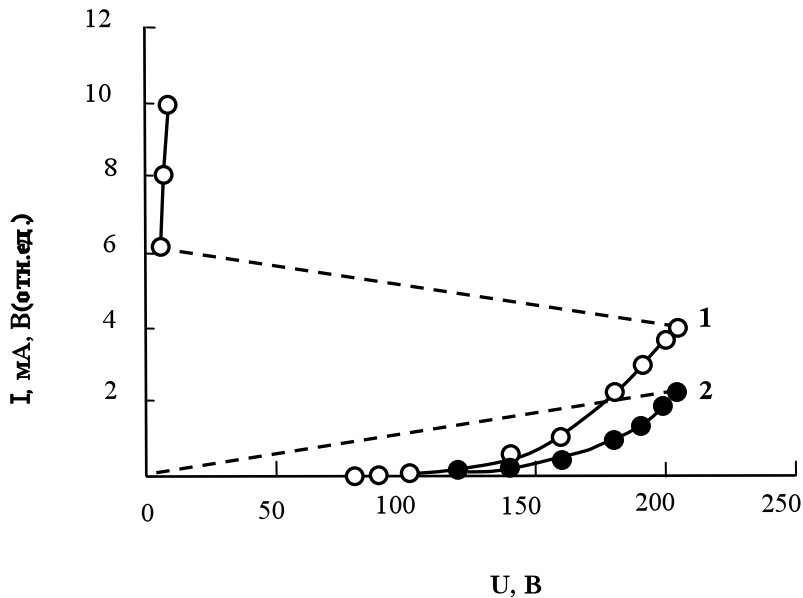


Рис. 4. Вольтамперная (1) и вольт-яркостная (2) характеристики монокристаллов $\text{GaS}_{0.8}\text{Se}_{0.2}$ при 77 К.

Интересным фактом является то, что напряжение срыва уменьшается под действием света из области фундаментального поглощения. Благодаря этому в исследованных кристаллах наблюдается фототриггерный эффект. Суть этого эффекта заключается в том, что если рабочая точка соответствует точке, близкой

к точке переключения на темновой вольтамперной характеристике, то включение света из области собственного поглощения с достаточной интенсивностью, переводит структуры из высокоомного состояния в низкоомное. Спектральное распределение напряжения переключения в области собственного поглощения совпадает со спектром фотопроводимости.

6. Обнаружено некоторое взаимодействие между явлениями электролюминесценции и переключения. Установлено, что электролюминесценция в исследованных кристаллах наблюдается лишь в нелинейном предпробойном участке ВАХ. Рост яркости электролюминесценции продолжается до напряжения переключения. Когда образец переключается из высокоомного состояния в низкоомное состояние, яркость электролюминесценции резко падает до нуля (рис.4, кривая 2). Это позволяет изготовить управляемые электролюминесцентные переключатели на основе указанных кристаллов и ГП. В низкоомном состоянии на образце никакое излучение не появляется, несмотря на то, что образец при этом обладает положительным дифференциальным сопротивлением. Такое скачкообразное уменьшение интенсивности электролюминесценции, по-видимому, связано с возникновением токового шнура в кристаллах при переключении. При этом почти весь ток протекает по этим шнурам. Отсутствие излучения в этом токовом шнуре обусловлено термическим гашением электролюминесценции, так как большое значение тока в низкоомном состоянии приводит к выделению Джоулева тепла в этом шнуре. В каждом образце переключение тока и электролюминесценции повторяется многократно. При этом значительного изменения в параметрах исследуемых элементов не происходит.

Спектры излучения изученных кристаллов охватывают широкую область длин волн от 460 до 1000 нм. В спектрах излучения монокристаллов GaSe наблюдается полоса излучения с максимумом 640 нм, а в деформированных кристаллах наблюдается дополнительная полоса с максимумом 875 нм. В кристаллах GaS наблюдаются полосы излучения с максимумами 482, 530 и 575 нм, а в спектрах излучения твердого раствора $GaS_{0,8}Se_{0,2}$ наблюдаются лишь полосы с максимумами 530 и 575 нм.

Для объяснения механизма возбуждения электролюминесценции снимались зависимости интегральной интенсивности электролюминесценции от прикладываемого к образцу напряжения и прошедшего через образец тока в предпробойной области ВАХ. Наблюдаемые зависимости свидетельствуют об инжекционном механизме электролюминесценции, как это имеет место в других слоистых кристаллах типа A^3B^6 .

Наблюдаемые особенности показывают, что имеется некоторое сходство между исследуемым S-элементом и управляемым симметричным диодом-тиристором. Это делает возможным применение их в оптоэлектронике в качестве электролюминесцентного «тиристора», управляемого светом и температурой. Поскольку излучение находится в видимой области спектра, эти элементы могут использоваться в матричных экранах и в цифровых индикаторах, где отображается информация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будзуляк И.М., Григорчак И.И., Остафийчук Б.К., Яблонь Л.С. Получение, свойства и возможности применения в нанoeлектронике лазерных интеркалатов. // ЖТФ, 2002, т.72, № 6, с.41-43.
2. Wei Shi, Yujie J. Ding, Nils Fernelius, Konstantin Vodopyanov. Efficient, tunable, and coherent 0.18 - 5.27-THz source based on GaSe crystal: erratum. / Optics Letters, 2003, v. 28, №2, p.136.
3. Ванг Т.Дж., Гао Дж.Ю., Андреев Ю.М. и др. Твердые растворы $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$. // Изв. ВУЗ-ов, Физика, 2007, т.50, № 6, с.35-40.
4. Кязым-заде А.Г., Салимова Н.М., Тагиров В.И. Фоточувствительность поверхностно-барьерных структур на основе слоистых соединений типа A^3B^6 . // Микроэлектроника, 1981, т.10, № 4, с.369-371.
5. Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Курбатов Н.Л., Чишко В.Ф. Исследование гетеропереходов InSe-GaSe, приготовленных посадкой на оптический контакт. // ФТП, 1980, т.14, в. 6, с.1115-1119.
6. Драпак С.И. Воробец М.О., Ковалюк З.Д. Влияние одноосного сжатия на параметры фотопреобразования оптического контакта p-GaSe-n-InSe. // ФТП, 2005, т.39, № 5, с.633-635.
7. А.Г.Кязым-заде, В.М.Салманов, А.Мохтари, В.В.Дадашова, А.А.Агаева. Электрoлюминесценция и фототриггерный эффект в монокристаллах твердых растворов $\text{GaS}_x\text{Se}_{1-x}$. // ФТП, 2008, т.42, № 5, с.532-535.
8. Викулин И.В., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1980, 296 с.

A^3B^6 TIPLI LAYVARI KRİSTALLAR ƏSASINDA FUNKSIONAL ELEMENTLƏR
A.H.KAZIMZADƏ, V.M.SALMANOV, A.Z.ABASOVA,
L.H.HƏSƏNOVA, S.Ə.CAHANGİROVA, V.V.DADAŞOVA
XÜLASƏ

İşdə A^3B^6 tipli layvari kristalla və InSe-GaS_xSe_{1-x} sistemində heteroqəçidlər əsasında müxtəlif funksional elementlərin – koordinata həssas fotoelementlərin, idarəolunan spektral həssaslığa malik sendviç fotorezistorların, yaddaşlı və sürətli S-diodların, fototriqgerlərin və glectrolüminessensiyalı çeviricilərin hazırlanma imkanları nəzərdən keçirilir. Bu elementlərin bəzi əsas xarakteristikaları və tədqiqatların ümumiləşmiş təcrübə nəticələri verilir. Qısa şəkildə göstərilən elementlərin iş prinsipinin əsasını təşkil edən hadisələrin yaranma mexanizmi təhlil edilir.

FUNCTIONAL ELEMENTS ON THE BASE OF A^3B^6 -TYPE LAYERED CRYSTALS

A.G.KYAZYMZADE, V.M.SALMANOV, A.Z.ABASOVA,
L.H.HASANOVA, S.A.JAHANGIROVA, V.V.DADASHOVA
SUMMARY

The work studies the opportunity of manufacturing various functional elements, such as coordinate-sensitive photo cells, sandwich photoresistors with a controlled spectrum of sensitivity, high-speed S-diodes with memory, phototriggers and electroluminescent switches on the basis of monocrystals of layered compounds such as A^3B^6 , as well as heterojunctions in InSe-GaS_xSe_{1-x} system. Some basic characteristics and generalized experimental results of the research of the specified elements are determined. Mechanisms of occurrence of the phenomena laying on the basis of a principle of the work of the specified elements are briefly analyzed.