

**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«АЗЕРБАЙДЖАН ХАВА ЙОЛЛАРЫ»  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ**

*на правах рукописи*

**АГИЛЬ АДИЛЬ оглы МОВСУМОВ**

**ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕХНИЧЕСКИЕ  
ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛОВ  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$**

**3361.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро и нанoeлектроника**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени доктора  
философии по технике

**БАКУ-2015**

## **Работа выполнена в Национальной Академии Авиации**

**Научные руководители:** д.ф-м.н., академик А.М.Пашаев

к.ф-м.н., доцент С.Х.Агаева

**Официальные оппоненты:** д.ф-м.н., профессор К.Р.Аллахвердиев

д.т.н., Ф.К.Алескеров

**Ведущая организация:** Азербайджанский Технический  
Университет, кафедра Электроники

Защита состоится «25\_\_\_»\_\_\_12\_\_\_ 2015 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета D 06.001 при Национальной Академии Авиации по адресу: AZ 1045, г. Баку, пр. Мярдакан 30.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Национальной Академии Авиации.

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета D 06.001,

д.ф.т., доцент

С.Б.Габидуллаев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы:** Соединениям и твердым растворам с участием лантаноидов присущи такие свойства, как высокая температура плавления, большая механическая прочность, способность сохранять полупроводниковые свойства при высоких температурах, высокая тензочувствительность, высокие значения термоэлектрической эффективности и т.д.

Изменяя состав этих материалов, можно добиться необходимого сочетания физических свойств и создавать сплавы с требуемыми характеристиками.

Интерес к полупроводниковым соединениям типа  $A^{III}B^{III}X_2^{VI}$ , являющимися аналогами соединений типа  $A^{III}B^{VI}$ , обусловлен наличием в них непарного числа валентных электронов, резкой асимметрией химической связи, ряда специфических особенностей строения кристаллических решеток и возможностью в рамках соответствующих решеток в широком диапазоне осуществить вариацию химического состава. На основе этих материалов и их твердых растворов созданы приемники ближнего инфракрасного излучения (ИК), переключающие приборы, элементы электрической и оптической памяти, модуляторы лазерного излучения и другие функциональные устройства, применяемые в оптикоэлектронике. Известно, что в тройных соединениях  $TlInX_2$  и  $TlLnX_2$  атомы индия и лантаноидов при конкуренции с атомомиталлия проявляют трехвалентность и их ионные радиусы близки, поэтому частичным замещением атомов индия атомами лантаноидов получены и исследуются твердые растворы  $TlIn_{1-x}Ln_xX_2^{VI}$ , обладающие сочетанием перечисленных выше свойств. Твердые растворы  $TlIn_{1-x}Ln_xX_2^{VI}$ , в целом, расширяют диапазон физических свойств полупроводников. Для получения качественно новых результатов, имеющих важные практические значения, необходимо провести всесторонние исследования их физических свойств.

В литературе имеются сведения о некоторых физических свойствах твердых растворов на основе  $TlInSe_2$  с участием лантаноидов. Несмотря на наличие данных по получению, исследованию электрофизических, тепловых, оптических и фотоэлектрических свойств твердых растворов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ , сведения по исследованию тензометрических свойств этих кристаллов вовсе отсутствуют. Разработки в

этом направлении могли бы открыть новые практические возможности в полупроводниковой технике.

**Целью диссертационной работы** является разработка технологии изготовления тензодатчиков из игольчатых кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ , установление закономерностей поведения их характеристик от состава, температуры, действия звуковых волн и электромагнитного излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

-разработать методику синтеза и выращивания монокристаллов твердых растворов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  ( $0,02 \leq x \leq 0,06$ ).

-разработать технологию изготовления тензодатчиков на основе полученных кристаллов;

-исследовать их тензометрические свойства в зависимости от механической деформации, температуры и оптической подсветки;

-исследовать эффект пьезомодуляции полученных кристаллов;

-исследовать влияние электромагнитного излучения и звуковых волн на полученные кристаллы;

-выявить технические особенности и возможности практического применения исследуемых материалов.

### **Научная новизна:**

-разработана соответствующая технология изготовления тензодатчиков с использованием игольчатых монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ ;

-исследованиями зависимости тензочувствительности от механической деформации, температуры и оптической подсветки выявлено, что ее можно увеличить под действием внешних факторов;

-выявлены и исследованы эффекты пьезомодуляции проводимости и пьезофотопроводимости кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ ;

-выявлены возможности применения тензодатчиков изготовленных на основе монокристаллов  $TlIn_{0,98}Gd_{0,02}Se_2$  для регистрации динамических процессов;

-исследовались влияния направленной деформации на фотоэлектрические свойства кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ ;

-впервые выявлен и исследован акустофотовольтаический (АФВ) эффект в кристаллах  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ .

### **Практическая ценность работы:**

-впервые разработано устройство для многоточечного тензометрирования на основе кристаллов  $TlIn_{0.98}Gd_{0.02}Se_2$ ;

-предложены фоторезисторы для регистрации переменных электромагнитных излучений в ближней инфракрасной (ИК) области спектра. На основе выявленного эффекта пьезомодуляции проводимости в кристаллах разработаны датчики для регистрации слабых магнитных и световых сигналов.

### **Основные положения выносимые на защиту:**

1.Разработка технологии изготовления тензодатчиков на базе игольчатых монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ ;

2.Установление закономерностей изменения параметров тензодатчиков из кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  в зависимости от состава, значений механической деформации и температуры;

3.Рассмотрение зависимости пьезоэлектрических параметров тензодатчиков от механической деформации;

4.Характер зависимости коэффициента тензочувствительности тензодатчиков из монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  от температуры;

5.Влияние видимого электромагнитного излучения на тензорезистивные и фоторезистивные свойства тензодатчиков;

6.Влияние направленной деформации на фотоэлектрические свойства монокристаллов;

7.Обнаружение и установление эффекта пьезомодуляции проводимости монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ ;

8.Влияние одновременного действия звуковых волн и электромагнитного излучения на фотоэлектрические свойства монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ ;

9. Практические возможности тензодатчиков на основе монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  для выявления и измерения механической деформации.

### **Публикация и апробация работы:**

По результатам исследований, входящих в данную диссертационную работу, опубликовано 9 научных статей в международных и республиканских журналах, 5 тезисов докладов в сборниках трудов научных конференций.

**Основные результаты диссертации были доложены и обсуждены на:**

1. I республиканской научной конференции «Современные проблемы физики» (Баку, БГУ, 2007)
2. XX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, ФГУП «НПО ОРИОН» 2008)
3. II республиканской научной конференции «Современные проблемы физики» (Баку, БГУ, 2008)
4. Международной конференции «Научно-технический прогресс и современная авиация» (Баку, Аз.НАА, 2009)
5. Научно-технической конференции молодых исследователей (Баку, Университет Кавказ, 2010)

### **Структура и объём работы:**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка использованной литературы. Работа содержит 149 страниц компьютерного текста, 29 рисунков и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 138 наименований.

**В первой главе диссертации** подробно анализированы состояния изученности базового соединения  $TlInSe_2$ , особенности его кристаллической и зонной структур, электрофизических, тепловых, оптических и фотоэлектрических свойств.

В этой же главе анализированы и обобщены литературные данные посвященные физико-химическому, рентгенофазовому анализу, исследованию физических свойств сплавов систем  $TlInX_2$ - $TlInX_2$ .

Из анализов данных по исследованию систем  $TlInSe_2$ - $TlGdSe_2$  выявлено, что в этой системе наблюдается растворимость на основе исходной фазы  $TlInSe_2$  до 9 мол. %  $TlGdSe_2$ . Имеются данные по исследованию некоторых физических свойств этих фаз.

**Вторая глава диссертации** посвящена вопросам технологии изготовления тензодатчиков на базе исследуемых кристаллов.

В первом параграфе главы изложена технология выращивания монокристаллов  $TlInSe_2$  и твердых растворов на их основе.

Во втором параграфе главы описывается технология изготовления тензодатчиков на основе монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ .

В следующем параграфе главы диссертации излагаются статический и динамический методы исследования тензорезистивных свойств кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ .

**В третьей главе диссертации** дается последовательная информация по этапам формирования полупроводниковых преобразователей, об основных параметрах полупроводниковых тензопреобразователей, зависимости коэффициента тензочувствительности от величины механической деформации, температуры и других внешних факторов.

Второй параграф третьей главы посвящен исследованию тензорезистивных свойств кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ , где ( $0 \leq x \leq 0,06$ ) в зависимости от деформации при различных температурах и в зависимости от температуры при различных значениях механической деформации.

Выявлено, что при малых значениях деформации  $(1-5) \times 10^{-5}$  тензочувствительность кристаллов не изменяется, а в дальнейшем, с увеличением величины деформации происходит его линейное увеличение. Полученные результаты объяснены на основе зонной структуры базового соединения  $TlInSe_2$ .

Следующий, третий параграф главы посвящен исследованию эффекта пьезомодуляции проводимости кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ . Проводимые нами исследования показали, что, если на закрепленном с одного конца тонком стальном листе с наклеенными кристаллами

$TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  возбуждать периодически механические колебания, то с той же частотой происходит модуляция проводимости.

Эффект пьезомодуляции проводимости указанных кристаллов исследовался в зависимости от степени деформации и подсветки. Выявлено, что наличие пьезорезистивного эффекта более четко проявляется в динамическом режиме. Если кристалл испытывает пропорциональную деформации  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin 2\pi\nu t$  при отсутствии оптической подсветки, дополнительная проводимость  $\Delta\sigma(\nu, t)$  и соответствующий переменный сигнал  $\Delta\sigma_n(\nu, t)$  однозначно характеризуется пьезопроводимостью:

$$\Delta\sigma_n(\nu, t) = \frac{1}{VR_n} \Delta V_n(\nu t) = \Delta\sigma_{0n} \sin 2\pi$$

Величина амплитудных значений выявленных пьезосигналов при этом растет с повышением степени деформации.

Однако, при приложении оптической подсветки дополнительная проводимость  $\Delta\sigma(\nu, t)$  и соответствующий пьезосигнал  $\Delta\sigma_n(\nu, t)$  аддитивно складывается из двух компонентов: из пьезопроводимости  $\Delta\sigma_n(\nu, t)$  и пьезофотопроводимости  $\Delta\sigma_{n\phi}(\nu, t)$  и соответствующих сигналов  $\Delta V_n(\nu, t)$  и  $\Delta V_{n\phi}(\nu, t)$ . Следовательно, пьезофотопроводимость определяется как :

$$\Delta\sigma_{n\phi} = \frac{1}{VR_n} [\Delta V(\nu, t) - \Delta V_n(\nu, t)] = \frac{1}{VR_n} [\Delta V_0 - \Delta V_{0n}] \cdot \sin 2\pi\nu t$$

Таким образом, измеряя амплитудные значения при одной и той же степени деформации в темноте и при различной освещенности, можно проследить за изменением величины пьезофотопроводимости с ростом интенсивности подсветки.

В этом же параграфе изложены результаты исследования пьезофотопроводимости монокристалла  $TlIn_{0,98}Gd_{0,02}Se_2$ . Выявлена линейная зависимость амплитуды пьезофотопроводимости от интенсивности подсветки. Показано, что величина пьезосигнала при интенсивности  $J=6500$  люкс и деформации  $8 \cdot 10^{-5}$  оказывается практически равной величине сигнала, соответствующей деформации  $27,5 \cdot 10^{-5}$  в темноте. Таким образом, из полученных нами результатов следует, что наблюдаемый пьезофоторезистивный эффект может рас-



ширить возможности полупроводниковой тензометрии для регистрации динамических процессов.

В следующем, четвертом параграфе третьей главы рассмотрены влияния направленной деформации на фотоэлектрические свойства кристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Se}_2$ . Исследовались люксамперные характеристики недеформированных и деформированных кристаллов, соответствующих составам  $x=0.02, 0.04$  и  $0.06$ . Выявлено, что амплитудное значение фототока при частоте модуляции белого света  $10^3$  Гц, по отношению к своему максимальному значению увеличивается на 50; 40; 40; 37 % для составов  $x=0; 0.02, 0.04$  и  $0.06$  соответственно при изгибе подложки, соответствующему сжатию  $-2,5 \cdot 10^{-3}$ . Показано, что по сравнению с недеформированным состоянием упругое сжатие приемников ( $-2,5 \cdot 10^{-3}$ ) приводит к повышению их удельной интегральной фоточувствительности. При указанном сжатии еще больше растет спектральная чувствительность, особенно в ближней ИК области спектра.

Выявлено, что в люксамперной характеристике фоторезистора из монокристаллов  $\text{TlIn}_{0,98}\text{Gd}_{0,02}\text{Se}_2$  наблюдаются два участка: при малых интенсивностях света, зависимость  $J_{\phi} \approx I^{\alpha}$  имеет линейный характер ( $\alpha = 1$ ), а при больших - сублинейный ( $\alpha = 0.5$ ). Причем интересный с точки зрения практики линейный участок характеристики, охватывающий область  $0-500$  люкс при отсутствии деформации, в значительной степени расширяется в сторону больших интенсивностей света, достигая 1130 люкс при упругом сжатии  $-2 \cdot 10^{-3}$ . Выявлено, что наибольшее относительное повышение фототока, т.е. фоточувствительности с упругим сжатием, имело место в длинноволновой области спектральной характеристики.

На основе полученных результатов предложены микроминиатюрные фоторезисторы которые могут быть успешно применены в микросхемах, спектрометрии, микрофотометрии и других областях регистрации переменных электромагнитных излучений в ближней ИК области спектра.

В пятом параграфе этой же главы приведены результаты исследования АФВ эффекта кристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Se}_2$ . В результате выявлено, что, при одновременном воздействии электромагнитного излучения и звуковых волн на исследуемые кристаллы на концах образцов появляется АФВ э.д.с., полярность и область спектральной чувстви-

тельности которой управляется частотой звуковой волной. Исследования проводились для состава  $TlIn_{0,98}Gd_{0,02}Se_2$ .

Механизм особенностей обнаруженного нами эффекта, вероятно, связан с резонансным возбуждением самостоятельных анионных радикалов в кристаллах типа  $TlInSe$  электростатической индукцией или же неоднородной упругой деформацией, приводящей к переразрядке соответствующих поверхностей на звуковой частоте. На этой частоте, видимо происходит модуляция поверхностных состояний. Неудавшиеся за частотой модуляции неосновные носители, генерируемые светом, накапливаются у соответствующей поверхности и приводят к возникновению АФВ эффекта. При справедливости подобного механизма, частотная зависимость эффекта должна быть весьма чувствительной к состоянию поверхности и имеющимся в кристалле центрам рекомбинации.

Обнаружено, что величина АФВ э.д.с. зависит от интенсивности и спектрального состава света, а также от частоты и амплитуды звука, и может быть сведена к нулю абсолютным затемнением кристалла или же снятием акустических волн. Для образцов различного состава при напряжении питания излучателя 10 В и освещенности 1000 люкс величина возникающей АФВ э.д.с. варьировалась в пределах от 1 до 14 В.

Выявленный АФВ эффект можно рассматривать как изменение известного акустоэлектрического эффекта под воздействием света. Физическая сущность самого акустоэлектрического эффекта сводится к возникновению в полупроводниках э.д.с. вследствие увлечения концентрации носителей тока в нем упругой волной.

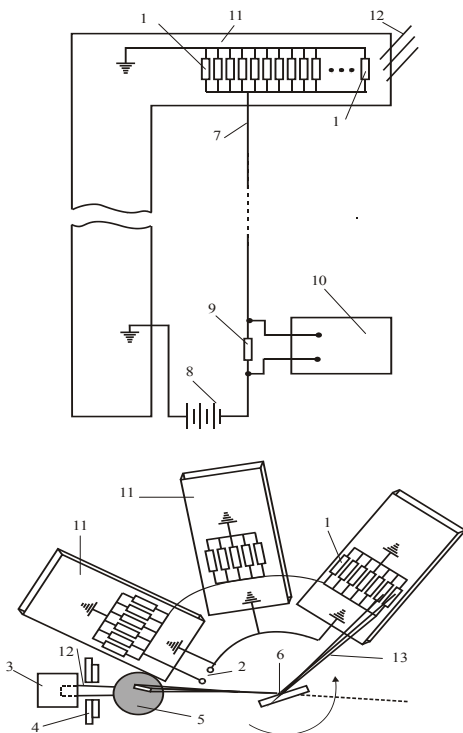
**Первый параграф четвертой главы** посвящен разработке устройства для многоточечного тензометрирования на базе монокристаллов  $TlIn_{0,98}Gd_{0,02}Se_2$ . Для устранения существующих недостатков многоточечной тензометрии предлагается упрощенная схема измерения.

В представленном нами способе подключение тензодатчиков на основе кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  к каналу регистрации производится путем последовательного зондирования самих датчиков электромагнитным излучением оптического диапазона. Данный способ многоточечной тензометрии обеспечивает проведение записи тензометрической информации от множества точек испытываемой конструкции по одному единственному каналу.

Размещенные в различных точках и параллельно подключенные между собой идентичные датчики посредством одной линии связываются общим для всех датчиков каналом регистрации. Тензометрическая информация от каждого датчика поступает в общий канал лишь в момент облучения его электромагнитным излучением. Облучение избранного датчика значительно повышает его электропроводность и коэффициент тензочувствительности и, тем самым, «подключает» его к системе регистрации. Перемещая узкий световой зонд соответствующим образом по участку испытываемой конструкции с тензодатчиками, записывается распределение механической нагрузки, напряжения или же деформации по координатам размещенных датчиков. Таким образом, данный способ позволяет исключить множество соединительных отводов и помехи от них, сократить число каналов регистрации, уменьшить вес и габариты используемого электронного оборудования при многоточечном тензометрировании.

Сущность способа поясняется рисунком 1, на котором представлена принципиальная схема. Устройство содержит параллельно включенные полупроводниковые тензодатчики I с идентичными электрическими параметрами. Один из общих отводов 2 датчиков I заземлен на массу испытываемого объекта, а второй общий отвод 7 выполнен в виде экранированного проводника и через нагрузочное сопротивление 9 подключен к источнику постоянного напряжения 8. Устройство для регистрации 10 подключено к нагрузочному сопротивлению 9. Устройство снабжено источником электромагнитного излучения 3, создающим световой зонд 13 для последовательного «возбуждения» тензодатчиков I.

В соответствии с предлагаемым способом измерение производят следующим образом: при динамическом режиме измерения, зона размещения датчиков I находится в темноте или же освещена нейтральным для датчиков спектром света. Устройство для регистрации 10 настраивают на нулевой сигнал. Затем производят программированное оптическое зондирование тензодатчиков I с помощью источника электромагнитного излучения 3 и сканирующего устройства. В момент зондирования отдельного тензодатчика устройство для регистрации 10 избирательно реагирует на сигнал лишь от возбужденного светом тензодатчика. Избирательное действие зондирующего луча света при этом обуславливается двумя факторами: снижением сопротивления тензодатчика и повышением его коэффициента тензочувствительности.



**Рис. 1.** Схема устройства для многоточечного тензометрирования на основе кристалла  $TlIn_{0,98}Gd_{0,02}Se_2$

Таким образом, максимально возможное число параллельно подключенных тензодатчиков «п» для одного измерительного канала определяется интенсивностью светового зонда соответствующего спектрального состава, фоточувствительностью материала датчика и величиной пьезофоторезистивного эффекта. Расчеты показывают, что число тензодатчиков на каждый измерительный канал может быть доведено до порядка  $10^2$ . Общее сопротивление параллельных «п»

датчиков  $R_0$  определится соотношением: 
$$\frac{1}{R_0} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}$$

где  $r_i$  - электросопротивление тензодатчика с порядковым номером « $i$ ». В неосвещенном состоянии или же при слабом естественном освещении датчики идентичны и характеризуются одной и той же

величиной сопротивления « $r$ ». Предположим, один из параллельно подключенных датчиков, например, « $n$ »-ый, возбуждается световым зондом и приобретает сопротивление « $r_c$ », а все остальные находятся в невозбужденном (естественном) состоянии, т.е.

$$r_1 = r_2 = r_3 = \dots r_{n-1} \equiv r \neq r_n \equiv r_c$$

При этом:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{n-1}{r} + \frac{1}{r_c}$$

Естественно, что изменение сопротивления зондированного тензодатчика станет заметным, начиная с уровня возбуждения, достаточного для выполнения условия  $\frac{n-1}{r} \approx \frac{1}{r_c}$ , если даже не имел место

(отсутствовал) пьезофоторезистивный эффект, согласно данному условию, число параллельных датчиков  $n = \frac{r}{r_c} + 1$ , т.е. определяется крат-

ностью изменения темнового ( $r$ ) и светового ( $r_c$ ) сопротивлений датчика, что при реально возможных интенсивностях составляет  $\frac{r}{r_0} \approx 10^2 \div 10^3$ . Однако, число датчиков практически оказывается значи-

тельно ( $10 \div 100$  раз) больше, чем определенное из указанного выше условия, за счет пьезофоторезистивного эффекта, так как тензосигнал от освещенного датчика за счет усиления тензочувствительности подавляет аналогичные сигналы от неосвещенных (невозбужденных)

датчиков даже при значительном их перевесе, т.е. при  $\frac{n-1}{r} \gg \frac{1}{r_c}$ ,

следовательно  $n \gg \frac{r}{r_c} + 1$ . Таким образом, из указанной выше оценки

следует, что практически число параллельных датчиков на один канал регистрации при этом может быть доведено до  $10^3 \div 10^5$ .

Ниже приведены конкретные примеры осуществления настоящего способа. Измерения проводились с использованием полупроводниковых тензодатчиков на основе кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ . Для осуществления предлагаемого способа в качестве упругой подложки использованы прямоугольные стальные ленты 11 электромагнитного резонатора. Идентичные по размерам и электрическим параметрам тензодатчики 1 из кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  размещены параллельно

оси пластинки на изолирующем слое из эпоксидно – крезольного лака ЭП-96.

Указанным прозрачным лаком герметизирована и верхняя поверхность датчиков. Параллельно соединенные между собою датчики, при этом, чередовались в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, через интервал  $\Delta l$ , не меньше ширины самих датчиков ( $0.5 \div 1$  мм).

Уprungие пластинки с размещенными параллельными датчиками на испытываемой поверхности (и неуказанными на схеме электромагнитными возбудителями) выстроены в радиальном направлении их нормалей, по окружности цилиндра с радиусом 30 м и центром на оси вращения отклоняющего зеркала. Монохроматические лучи 12 с длиной  $\lambda=1.06$  мкм от неодимового лазера через фотозатвор 4 и узкую щель 5 попадают на вращающееся зеркало 6. Отраженный от зеркала световой зонд 13, соответствующий площади приемного окна датчиков, перемещаясь по окружности, с определенной последовательностью «возбуждает» на своем пути тензодатчики 1. Свободный верхний конец упругой (стальной) подложки 11 приводится в периодические колебания на частоте резонанса, посредством переменного магнитного поля в направлении стрелки на рис.1. Тем самым, и датчики на упругой подложке испытывают от нее переменную (синусоидальную) деформацию на той же частоте. В области высоких частот в качестве подложки использованы пьезопластинки соответствующей формы. При макетном испытании, переменные деформационные сигналы от каждого датчика в момент его освещения («зондирования») регистрируются по электрической схеме на рис. 1.

Использование данного способа в машино-, судо-, самолето- и ракетостроении при многочастотном тензометрировании может привести к достижению существенного технико-экономического эффекта. При испытании новейших конструкций движущихся (наземных) и летающих («воздушных») аппаратов возникает большая нужда в многоточечном тензометрировании. При этом часто требуется необходимость размещения на объектах испытания соответствующим образом нескольких сот, а иногда тысяч и более тензодатчиков. Для регистрации поступающей от них информации пользуются многоканальными тензостанциями, где для каждого датчика предусмотрены автономные линии связи, блоки питания, усиления и собственные индикаторы (регистраторы). При таком огромном ( $10^2 \div 10^5$ ) количестве тензодат-

чиков проблематично создание множества самостоятельных линий связи между датчиками на расстоянии порядка 30 м. Помимо этого, используемые многоканальные тензостанции при этом занимают большое пространство, приобретают огромный (существенный) вес и требуют применения многочисленного сложного и дорогостоящего электронного оборудования.

Перечисленные недостатки существующей многоточечной тензометрии становятся особенно ощутимы при измерении в натуральных испытаниях. Сократив число каналов регистрации до единицы, можно, тем самым, существенно уменьшить вес и габарит используемого в измерительной технике оборудования. Множество отводов от объектов испытания до измерительных каналов (на большом расстоянии) при этом заменяется «ходячим» по объекту испытания тонким управляемым лазерным лучом. При этом, в момент освещения его лучом лазера каждый из датчиков включается в единственный канал регистрации. Подвижный световой зонд играет роль скоростных тензометрических переключателей. Эффективность такого рода (оптического) переключения заключается в значительном его быстродействии ( $10^{-3} \div 10^{-5}$  сек.) и в «беспроволочном» осуществлении.

Таким образом, из анализа выше изложенных материалов установлено проявление сильного пьезофоторезистивного эффекта вдоль тетрагональной оси монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  и усиление его оптической подсветкой, обусловленное многодолинной эллипсоидальной моделью изоэнергетических поверхностей и различием их смещений, приводящим к перераспределению носителей по ним.

Выявлены перспективы практического использования монокристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  в качестве приемников ближнего ИК и видимого диапазонов спектра, а также высокочувствительных, управляемых светом тензодатчиков.

Во втором параграфе четвертой главы дается информация о датчиках, созданных на базе кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  для регистрации малых изменений световых и магнитных сигналов.

Принцип измерения сигналов основывается на регистрации переменного пьезосигнала от тензодатчика за счет пьезомодуляции воздействием магнитного поля с частотой, соответствующей собственной частоте тензодатчика с магнитным кончиком или же наклеенного на резонаторе датчика в целом. При воздействии слабого магнитного поля с собственной частотой тензодатчика, в последнем возбуждаются

собственные колебания с заметной амплитудой. Высокая тензочувствительность тензодатчиков на основе кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  обеспечивает высокий уровень сигнала. Чувствительность указанных тензодатчиков к напряженности магнитного поля можно повысить за счет пьезофоторезистивного эффекта.

Интересно отметить, что кристаллы  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  ( $0 \leq x \leq 0,04$ ), испытывают синусоидальную деформацию на магнитных резонаторах в режиме малого нагрузочного сопротивления и полученный сигнал подается на узкополосный усилитель, настроенный на частоту пьезомодуляции. Величина пьезорезистивного сигнала в рассмотренном интервале (0-6500 люкс) менялась с интенсивностью света. Данная зависимость при деформации  $8 \times 10^{-5}$  характеризовалась коэффициентом 10-12 мВ/лк. Отличительной особенностью датчиков на основе вышеуказанных кристаллов является возможность регистрации ими слабых изменений интенсивности света.

Пьезофоторезисторы могут быть применены для регистрации слабых изменений интенсивности света. Если на кристалл, испытывающий синусоидальную деформацию с частотой  $V_n$ , направить также переменный, в частности, синусоидальный свет с частотой  $v_\phi$ , то от кристалла, помимо пьезосигнала  $\Delta V_n(v_n, t) = \Delta V_{on} \cdot \sin 2\pi v_n t$  за счет пьезомодуляции проводимости, поступит также переменный пьезофотосигнал  $\Delta V_\phi(v_n, t) = \Delta V_{on} \cdot \sin 2\pi v_n t$ , представляющий суперпозицию сигналов чистой фотопроводимости и пьезофотопроводимости с той же частотой. При близких частотах пьезо- и фотомодуляции ( $v_n$  и  $v_\phi$ ) осуществляется интерференция данных сигналов, наблюдаются биения.

Суммарный сигнал при этом представится в виде

$$\Delta V_{n\phi} = \Delta V_{on\phi} \cdot \sin 2\pi \frac{v_n + v_\phi}{2} t,$$

где,

$$\Delta V_{on\phi} = (\Delta V_{on} + \Delta V_{o\phi}) \cos 2\pi \frac{v_n + v_\phi}{2} t.$$

За период биения суммарный переменный сигнал со средней частотой  $\frac{v_n + v_\phi}{2}$  перейдет через нулевое значение "n" раз. Число "n" определяется формулой



$$n = \frac{\nu_n + \nu_\phi}{\nu_n - \nu_\phi}.$$

Следовательно, число "n" является весьма чувствительным показателем изменения частоты соответствующих модуляций. При известной (эталонной) частоте одной модуляции по числу "n" с высокой точностью можно судить о величине частоты другой модуляции, так как

$$\nu_\phi = \frac{n+1}{n-1} \nu_n (\nu_n < \nu_\phi).$$

Последнее соотношение приведено при эталонной частоте пьезомодуляции в таблице.

Таблица.

$\nu_n = 202 \Gamma\text{ц}$		
N	$\nu_\phi$ (Гц эксп.)	$\nu_\phi$ (Гц расч.)
44	21.1	21.141
50	21	21.025
64	20.8	20.841
74	20.7	20.753
84	20.7	20.68
94	20.6	20.634

С помощью вышеуказанных датчиков на основе кристаллов  $\text{TlIn}_{1-x}\text{Gd}_x\text{Se}_2$  можно точно контролировать стабильность переменных световых и магнитных сигналов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

1. В диссертационной работе разработана технология изготовления тензодатчиков на основе игольчатых монокристаллов сплавов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ .
2. Исследованиями тензометрических свойств в зависимости от состава, температуры и механической деформации кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  установлено, что они имеют высокий коэффициент тензочувствительности, который можно увеличить под действием внешних факторов. Выявлено что, при температуре  $280^\circ \text{C}$  и деформации  $\varepsilon = 20 \cdot 10^{-5}$  коэффициент тензочувствительности  $TlInSe_2$  составляет 2500, а для твердых растворов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  с  $x=0.02$ ,  $x=0,04$ ,  $x=0.06$  – 2400, 2300 и 2170 соответственно, номинальное сопротивление образца вышеуказанного состава с увеличением содержания гадолиния до 6 мол % уменьшается от  $10^7$  до  $10^5$  Ом.
3. Показано, что при возбуждении периодических механических колебаний в кристаллах  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  с той же частотой происходит модуляция проводимости. Величина амплитудных значений колебаний растет с повышением деформации или же амплитуды резонатора.
4. Исследовано влияние направленной деформации на фотоэлектрические свойства кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ . Показано, что эти кристаллы, благодаря высокой тензочувствительности, значительной гибкости и способности скалываться на желаемые нитеобразные пластинки с зеркальными гранями являются исключительно эффективными материалами для полупроводниковой тензометрии.
5. Выявлено, что в результате одновременного воздействия электромагнитного излучения и звуковых волн на кристаллы  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  на электродах появляется существенная электродвижущая сила или ток при их замыкании. Вид спектральных характеристик тока короткого замыкания, обусловленный мощностью и частотой акустических волн, может быть monopлярным или биполярным, в зависимости от воздействующих внешних волн, а также от величины межэлектродных расстояний.
6. Обнаружен эффект пьезомодуляции проводимости и указано на возможность создания из кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  новых типов

преобразователей-пьезофоторезисторов и световых, магнитных датчиков на резонансных частотах. Показано, что на основе этих кристаллов могут быть созданы малогабаритные, высокочувствительные полупроводниковые тензодатчики с высокой чувствительностью к малым вибросмещениям, давлениям, а также переменным магнитным полям. На принципе биения пьезо- и фотопроводимости кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  могут быть созданы высокочувствительные датчики для контроля и регистрации частотной стабильности пьезо- и фотомодуляции.

7. На основе полученных результатов исследования АФВ эффекта были предложены возможности разработки устройства для многоточечного тензометрирования и датчиков для регистрации малых изменений световых, магнитных сигналов.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ СТАТЕЙ

1. A.A.Mövsümov, X.S.Xəlilova, S.X.Ağayeva.  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  kristallarında tenzoeffektin tədqiqi. BDU, Fizika problemləri institutu «Fizikanın müasir problemləri» I Respublika konfransının materialları. Bakı Dövlət Universiteti Fizika problemləri institutu, 6-8 dekabr 2007, s. 216-217.
2. Ağayeva S.X, Mövsümov A.A.  $TlIn_{0.98}Gd_{0.02}Se_2$  monokristalının yarımkeçirici tenzometriyada tətbiq olunma imkanları. Milli Aviasiya Akademiyası, 2014, Elmi əsərlər № 2, s. 131-138.
3. Paşayev A.M, Mövsümov A.A, Ağayeva S.X, Allahyarov E.Ə.  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  kristallarının pyezomodulyasiyası və onların əsasında ötürücü elementlərin hazırlanma imkanları. Az.NAA, Труды Международной конференции «Научно-технический прогресс и современная авиация» посвященной 75-летию академика А.М.Пашаева. Баку, Национальная Академия Авиации, 12-14 февраля 2009, Том I, с. 215-218.
4. A.A.Movsumov, X.C.Xalilova, B.D.Pustamov, S.X.Agaeva. Устройства для многоточечного тензометрирования. AzTU-nun Elmi əsərləri, fundamental elmlər, Bakı, Azərbaycan Texniki Universiteti, 2008, cild VII (25), №1, s. 26-30.
5. A.A.Movsumov, Влияние направленной деформации на фотоэлектрические свойства кристаллов, AzTU, Elmi əsərlər, fundamental elmlər, Bakı, Azərbaycan Texniki Universiteti, 2011, cild X (36), №4, s. 19-25.
6. A.M.Пашаев, A.A.Movsumov, C.X.Agaeva Технология изготовления тензодатчиков из кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ . Ümummilli liderimiz Heydər Əliyevin anadan olmasının 87-ci il dönmünə həsr olunmuş Gənc tədqiqatçıların ümumrespublika elmi konfransı, Tezislər, Qafqaz universiteti, 06-07 may 2010-cu il, s. 2-3.
7. A.M.Пашаев, C.X.Agaeva, A.A.Movsumov. Тензорезистивные свойства кристаллов  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ . Az. МАА-ның Elmi məcmuələri. Bakı, Milli Aviasiya Akademiyası, 2007, cild 9, №4, s. 27-31.
8. A.M.Пашаев, Э.М.Годжаев, A.A.Movsumov, X.C.Xalilova, C.X.Agaeva. Акустофотовольтаический эффект в кристаллах

- $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$ , Журнал «Неорганические материалы», Россия, Москва, 2010, Том 46, №1, с. 20-22.
9. Годжаев Э.М., Назаров А.М., Мовсумов А.А., Халилова Х.С., Бархалов Б.Ш. Акустофотовольтаический эффект в монокристаллах  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  ( $x=0;0.02$ ). ФГУП «НПО Орион», XX-ая Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Тезисы докладов, 27-30 мая 2008, Москва, Россия, с. 212.
  10. М.Т.Дадашов, А.А.Мовсумов, Характеристики тензодатчиков на основе цепочных кристаллов типа  $A^{III}B^{III}X_2^{VI}$ . Bakı Dövlət Universiteti, Fizika problemləri institutu «Fizikanın müasir problemləri» I Respublika konfransının materialları, 6-8 dekabr 2007, s. 236-238.
  11. Пашаев А.М., Агаева С.Х., Мовсумов А.А. Пьезомодуляция проводимости кристаллов, Milli Aviasiya Akademiyası, 2013, Elmi əsərlər № 1, s. 25-33.
  12. Э.М.Годжаев, Д.М.Кафарова, А.А.Мовсумов, В.Д.Рустамов. Устройства для многоточечного тензометрирования на базе монокристалла  $TlGaTe_2$  BDU, Fizika problemləri institutu. AMEA-nın müxbir üzvü, əməkdar Elm xadimi, «Şöhrət» ordenli, professor Sabir Əbdülmanaf oğlu Hacıyevin 80 illik yubileyinə həsr olunmuş «Fizikanın müasir problemləri» II Respublika konfransının materialları. Bakı Dövlət Universiteti Fizika problemləri institutu, 28-29 noyabr 2008, s. 175-176.
  13. Э.М.Годжаев, К.Д.Гюльмамедов, А.Р.Ибрагимова, А.А.Мовсумов. Пьезомодуляция проводимости в монокристаллах  $InGaTe_2$ , Журнал «Неорганические материалы», Россия, Москва, 2010, Том 46, №4, с. 410-414.
  14. А.М.Pashaev, Е.М.Gojaev, А.А.Movsumov, Kh.S.Khalilova, S.Kh.Agayeva. Acoustophotovoltaic effect in  $TlIn_{0.98}Gd_{0.02}Se_2$  single crystals. Russia, Moscow, ISSN 0020-1685, Inorganic materials, 2010, Vol. 46, No 1, pp.13-15.

**Aqil Adil oğlu Mövsümov**  
**TlIn<sub>1-x</sub>Gd<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> kristallarının tenzometrik**  
**xassələri və texniki xüsusiyyətləri**

**XÜLASƏ**

Dissertasiya işi  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  kristallarının tenzometrik xassələrinin tədqiqinə və onların tətbiq olunma imkanlarının öyrənilməsinə həsr edilmişdir. Dissertasiya işində müvafiq texnoloji rejim seçilməklə göstərilən tip bərk məhlulların monokristalları yetişdirilmiş, həmin kristallardan tenzoötürücülərin hazırlanma texnologiyası işlənmişdir.  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  monokristalları əsasında hazırlanmış tenzoötürücülərin tenzohəssaslıq əmsalının temperaturdan, deformasiyanın qiymətindən və tərkibdən asılı olaraq dəyişmə qanunauyğunluqları öyrənilmiş, kənar amillərin təsiri ilə tenzohəssaslıq əmsalının idarə oluna bilmə imkanı müəyyən edilmişdir. Göstərilən tip kristallarda elektrik keçiriciliyinin modulyasiyası və onun amplitud qiymətinin, deformasiyanın dəyişdirilməsi ilə idarə oluna bilməsi aşkar edilmişdir.  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  kristallarına eyni zamanda, bir-birinə perpendikulyar istiqamətdə səs və elektromaqnit dalğaları ilə təsir etdikdə nümunənin ucları arasında e.h.q. və ya qısa qapanma cərəyanı yaranması və alınmış spektral xarakteristikanın işıqın, səs dalğasının gücündən, tezliyindən və elektrodlar arasındakı məsafədən asılı olaraq idarə oluna bilməsi müəyyən edilmişdir. Göstərilən tip kristalların fotoelektrik xassələrinə mexaniki deformasiyaların təsiri öyrənilmiş və onların yarımkeçirici tenzometriya üçün əlverişli material olmaları aşkar edilmişdir. Tədqiqatın nəticəsi olaraq müəyyən edilmişdir ki,  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  kristalları əsasında, parametrləri idarə oluna bilən pyezorezistorlar, zəif maqnit sahəsini və kiçik deformasiyaları, təzyiq dəyişmələrini ölçmək üçün yüksək tenzo və fotonəssaslıq malik, kiçik ölçülü yarımkeçirici cihazlar, tezlik döyüntülərini aşkar edərək qeyd edən cihazlar yaratmaq mümkündür.

**Agil Adil oglu Movsumov**  
**Tensiometric properties of  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  crystals**  
**and technical characteristics**

**SUMMARY**

The dissertation work deals with the application and utilization possibilities of tensiometric properties of the  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  crystals. The monocrystals of solid solution of the shown type re grown by choosing applicable technological mode and also the production technology of the tensotransmitters from the same crystals is developed in this dissertation work. In this research work, depending upon the temperature, deformation value and compounds, the changing procedures of tensosensitivity coefficient of the tensotransmitters built on the basis of  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  monocrystals are studied and the controllability of the tensosensitivity coefficient under the influence of external factors is determined. In the given type of crystals, the modulation of electric conductivity is discovered and the controllability of its amplitude values is also specified by changing of deformation values. Generation of electromotive force (EMF) and short-circuit current between the finiteness of sample while affecting simultaneously the  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  crystals by noise waves and electromagnetic waves which are perpendicular to each other, are studied and the controllability of produced spectral characteristic depending on the current strength, sound wave power, sound speed and distance between electrodes are investigated. The influence of mechanical deformation on the photoelectric properties of shown type crystals is studied and according to the investigation, they are regarded as useful materials for semiconductor tensometry. As a result of the studies, it is possible to build the piezoresistors of which parameters can be controlled, and small semiconductor instruments having high tensosensitivity and photosensitivity, to measure weak magnetic field and small deformations, pressure changes and build recorders which can sense frequency beating on the basis of the  $TlIn_{1-x}Gd_xSe_2$  crystals.

**“AZƏRBAYCAN HAVA YOLLARI”  
QAPALI SƏHMDAR CƏMİYYƏTİ  
MİLLİ AVİASIYA AKADEMİYASI**

*Əlyazması hüququnda*

**AQIL ADİL OĞLU MÖVSÜMOV**

***TLINI-XGDXSE2* KRİSTALLARININ TENZOMETRİK  
XASSƏLƏRİ VƏ TEXNİKİ XÜSUSİYYƏTLƏRİ**

**3361.01– Bərk cisim elektronikas, radioelektron komponentlər,  
mikro və nanoelektronika**

Texnika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq  
üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

**AVTOREFERATI**

**BAKI-2015**