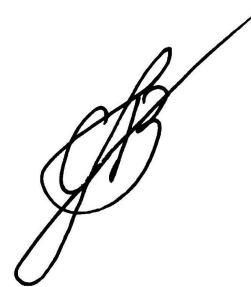


На правах рукописи



Сорочан Виталий Викторович

Исследование условий получения и характеристик позиционно-чувствительных фотоприёмников на основе слоёв nCdTe:In

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на физико-математическом факультете Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко (г. Тирасполь)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Сенокосов Эдуард Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, доцент
Степович Михаил Адольфович

кандидат физико-математических наук, доцент
Литвинов Владимир Георгиевич

Ведущая организация: ОАО “Научно-исследовательский институт
материалов электронной техники” (г. Калуга)

Защита состоится «24» сентября 2008 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.17 при Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал (г. Калуга, ул. Баженова, 2).

Автореферат разослан “___” _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Лоскутов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В ряду важных задач, стоящих перед современной физикой полупроводников и полупроводниковой электроникой, имеются такие, которые связаны с научными разработками и исследованиями новых типов *позиционно-чувствительных фотоприёмников* (ПЧФ), способных составить альтернативу или конкуренцию уже существующим ПЧФ. В данном случае речь идет о создании полупроводниковых фотоприёмников, обладающих возможностью не только обнаруживать наличие излучения, но и определять с высокой точностью в режиме реального времени местоположение (координаты) облучённой области. При этом важно, чтобы новые полупроводниковые ПЧФ отличались менее затратной технологией изготовления их светоприёмных элементов в сравнении с существующими и характеризовались чувствительностью к оптическому излучению в более широком спектральном диапазоне.

К настоящему времени разработаны и используются ПЧФ на основе фоторезистивных слоёв, р-п переходов, МОП - транзисторов. Однако функциональные фоторезисторы имеют сравнительно низкую разрешающую способность, а технология производства р-п переходов и МОП - транзисторов, используемых для ПЧФ, достаточно сложна. К тому же такие ПЧФ обладают чувствительностью к свету лишь в области собственного поглощения.

Предлагаемая конструкция ПЧФ на основе однородных полупроводниковых слоёв с нетрадиционной схемой расположения и коммутации электрических контактов позволяет фиксировать местоположение излучающего объекта по одной и двум координатам. Их спектральная область чувствительности может быть расширена за счет примесного поглощения, а технология производства упрощается в сравнении с существующими аналогами.

Использование слоёв теллурида кадмия для создания на их основе светоприёмных элементов ПЧФ стимулируется, с одной стороны, тем, что кристаллы CdTe, являясь прямозонными полупроводниками, обладают высокой чувствительностью к свету в спектральном диапазоне, соответствующем оптимальному значению для солнечных элементов. Кроме того, их свободные носители заряда имеют сравнительно высокие значения подвижности в области высоких температур. С другой стороны, из всех широкозонных соединений A_2B_6 кристаллы CdTe можно с одинаковым успехом получать как n-, так и p-типа проводимости. Отмеченные достоинства CdTe широко используются для создания солнечных элементов, детекторов радиационных излучений и ИК- фотоприёмников. Однако отсутствуют данные о применении кристаллов CdTe для изготовления на их основе светоприёмных элементов для ПЧФ.

Исходя из выше изложенного, разработка технологии получения и одновременного легирования мелкой донорной примесью фотопроводящих слоёв CdTe для светоприёмных элементов ПЧФ и исследование влияния тех-

нологических факторов на их выходные характеристики с целью коррекции и оптимизации параметров является актуальной задачей.

Цель работы: Изучение условий получения и одновременного легирования в квазизамкнутом объёме (КО) слоёв CdTe на стеклянных и (0001) Al₂O₃ подложках как основы для светоприёмных элементов ПЧФ; исследование влияния технологических факторов на электрофизические свойства слоёв nCdTe:In и выходные характеристики созданных на их основе ПЧФ; установление механизма токопрохождения через слои nCdTe:In при широкомасштабном изменении напряженности внешнего электрического поля; разработка и изготовление на основе слоёв nCdTe:In светоприёмных элементов для 4-х и 5-ти контактных ПЧФ; исследование выходных характеристик ПЧФ с целью коррекции и оптимизации их параметров.

Научная новизна работы определяется следующими новыми результатами:

1. Определены оптимальные условия получения и одновременного легирования в квазизамкнутом объёме слоёв nCdTe:In как основы для светоприёмных элементов ПЧФ.
2. Установлено, что перенос носителей заряда в пленочных сэндвич - структурах In-nCdTe:In-SnO₂ при напряжённостях электрического поля $E > 10^2$ В/см ограничивается объёмным зарядом инжектированных из In-контакта электронов, захваченных ловушечным уровнем $E_t = E_c - 0,26$ эВ с плотностью $N_t = 10^{14}$ см⁻³, а токопрохождение в планарных структурах In-nCdTe:In-In ограничивается до момента развития токовой неустойчивости S-типа межкристаллическими потенциальными барьерами высотой $e\Phi = 0,3$ эВ, располагаемыми вдоль линий тока на расстоянии ≈ 50 нм друг от друга.
3. Показано, что электрическое переключение S-типа в слоях nCdTe:In, наблюдаемое в диапазоне напряженностей электрического поля $10^3 \div 10^4$ В/см, имеет тепловую природу.
4. Впервые установлено, что светоприёмные элементы на основе однородных фотопроводящих слоёв nCdTe:In в форме диска с четырьмя квадратно расположенными электрическими контактами обладают позиционной чувствительностью к локальной засветке.
5. Показано, что распределение чувствительности по площадке светоприёмного элемента 4-х контактных ПЧФ на основе однородных слоёв nCdTe:In по форме, знаку выходного напряжения, а также зависимости его величины от толщины слоёв, интенсивности их локальной засветки и величины входного тока соответствуют теоретическим расчётам.
6. Впервые установлена корреляция формы полярных диаграмм чувствительности 4-х контактных ПЧФ со степенью неоднородности слоёв nCdTe:In приёмных элементов, являющаяся основой способа неразрушающего контроля однородности полупроводниковых слоёв.

7. Предложена физическая модель, объясняющая координатную зависимость выходного сигнала 4-х контактного ПЧФ, основанная на представлении о возникновении под действием приложенного напряжения электрического диполя в области оптического возбуждения светоприёмного элемента nCdTe:In.
8. Впервые установлено, что светоприёмные элементы на основе однородных фотопроводящих слоёв nCdTe:In в форме диска с нанесёнными по определенной схеме пятью электрическими контактами позволяют регистрировать положение пятна локальной засветки по двум координатам.
9. Показано, что выходные напряжения 5-ти контактных ПЧФ на основе слоёв nCdTe:In линейно возрастают с величиной входного тока и интенсивностью локальной засветки светоприёмных элементов nCdTe:In и тем самым согласуются с теоретическими расчетами.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Определены оптимальные условия получения и одновременного легирования в квазизамкнутом объёме слоёв nCdTe:In для светоприёмной основы ПЧФ.
2. Из однородных слоёв nCdTe:In изготовлены светоприёмные элементы для 4-х и 5-ти контактных ПЧФ, позволяющие регистрировать положение пятна локальной засветки по одной и двум координатам и обладающие удельной интегральной чувствительностью до $0,63 \text{ В}/(\text{мкА} \cdot \text{мВт})$ и $172 \frac{\text{мВ}}{\text{мм} \cdot \text{мкА} \cdot \text{мВт}}$ соответственно.
3. На основе исследований выходных характеристик 4-х контактных ПЧФ, изготовленных из слоёв nCdTe:In, разработан на уровне изобретения способ неразрушающего контроля однородности полупроводниковых слоёв.
4. В результате исследования S-переключения слоёв nCdTe:In в низкоомное состояние разработан на уровне изобретения способ установления теплового механизма переключения полупроводниковых образцов в низкоомное состояние.
5. Установлена возможность управления параметрами S-переключения слоёв nCdTe:In в низкоомное состояние посредством изменения интенсивности света из спектральной области, соответствующей краю собственного поглощения, что может быть использовано для создания на их основе фотореле.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Оптимальными технологическими условиями получения слоёв nCdTe:In в квазизамкнутом объёме на стеклянных подложках для светоприёмных элементов ПЧФ является температурный режим: $T_{\text{и}}=550 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{п}}=450 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_{\text{д}}=450 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. Равновесная концентрация основных носителей заряда, их подвижность и время жизни, а также форма спектральных характеристик фототока све-

топриёмных элементов на основе слоёв nCdTe:In определяется температурой источника легирующей In-примеси.

3. Слои nCdTe:In, полученные в квазизамкнутом объёме на стеклянных подложках, характеризуются существованием в них межкристаллических потенциальных барьеров высотой 0,3 эВ и ловушечных уровней $E_t = E_c - 0,26$ эВ с концентрацией $N_t = 10^{14}$ см⁻³.
4. Механизм развития токовой неустойчивости S-типа в слоях nCdTe:In связан с тепловым разогревом образцов. Параметрами переключения образцов в низкоомное состояние можно управлять путем их возбуждения светом из спектральной области, соответствующей краю собственного поглощения.
5. Основой разработанного на уровне изобретения способа определения теплового механизма переключения полупроводникового материала в низкоомное состояние является равенство пороговых значений напряжения и тока переключения в стационарном режиме с их эффективными значениями в динамическом режиме.
6. Светоприёмные элементы на основе однородных полупроводниковых слоёв nCdTe:In в форме диска с квадратно расположенными четырьмя электрическими контактами обладают позиционной чувствительностью к локальной засветке и могут использоваться для изготовления однокоординатных ПЧФ.
7. Основой разработанного на уровне изобретения способа неразрушающего контроля однородности полупроводниковых слоёв может служить зависимость от неё формы полярных диаграмм чувствительности 4-х контактных ПЧФ.
8. Координатная зависимость величины выходного сигнала 4-х контактного ПЧФ определяется влиянием электрического диполя, образующегося в области оптического возбуждения светоприёмного элемента nCdTe:In под действием приложенного напряжения.
9. Светоприёмные элементы на основе однородных полупроводниковых слоёв nCdTe:In в форме диска с нанесёнными по определенной схеме пятью электрическими контактами позволяют регистрировать положение пятна локальной засветки по двум координатам и могут использоваться для изготовления двухкоординатных ПЧФ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 1-й Украинской научной конференции по физике полупроводников (с международным участием), Одесса, 10-14 сентября 2002 г.; III Международной научно-практической конференции, Математическое моделирование в образовании, науке и производстве, Тирасполь, 17-20 сентября 2003 г.; BIT+ IV International Conference on Information Technologies 2004, Chisinau, 3-7 May, 2004 г.; Научной сессии МИФИ-2005, Москва, 24-28 января 2005 г.; IV Международной научно-практической конференции, Математическое моделирование в образовании, науке и производстве, Тирасполь, 5-9 июня 2005 г.;

Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов-2006”, Москва, 12-15 апреля 2006 г.; 5-й Всероссийской молодежной научной школе, Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение, Саранск, 3-6 октября 2006 г.; V Международной конференции, Математическое моделирование в образовании, науке и производстве, Тирасполь, 3-6 июня 2007 г; физических семинарах физико-математического факультета Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко и ежегодных конференциях профессорско-преподавательского коллектива, Тирасполь 2003 – 2008 г.г., научном семинаре Центра оптоэлектроники Академии наук Республики Молдова, Кишинёв, 14 марта 2008 г.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 4 в рецензируемых журналах из Перечня ВАК РФ, и 2 Патента на изобретение, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, одной обзорной и четырёх оригинальных глав, заключения, и списка цитируемой литературы (142 наименования), изложенных на 183 страницах текста, включая 77 рисунков и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, обозначена цель и поставлены задачи исследования, дан анализ научной новизны полученных результатов и их практической значимости, приведены положения, выносимые на защиту, а также перечень конференций, в рамках которых проходила апробация работы.

В первой главе приведён обзор экспериментальных работ, посвященных свойствам твердотельных образцов CdTe и технологии получения их плёнок вакуумным термическим напылением, а также различным конструкциям полупроводниковых ПЧФ. Содержится обзор основных кристаллографических и физических параметров кристаллов CdTe. Приведён обзор энергетических параметров примесно-дефектных состояний в кристаллах CdTe.

Рассматриваются результаты экспериментального исследования токовой неустойчивости S-типа в монокристаллах и тонких плёнках CdTe. Обсуждается влияние их поверхностных состояний на токовую неустойчивость.

Обзор различных конструкций полупроводниковых ПЧФ показывает перспективность технической реализации таких устройств на основе слоёв полупроводниковых соединений A_2B_6 . Анализ различных методов получения плёнок CdTe позволяет сделать вывод о преимуществах метода вакуумного осаждения в КО для изготовления на их основе светоприёмных элементов ПЧФ.

Завершает главу раздел, содержащий выводы из обзора литературы и постановку задач исследования.

Во второй главе исследовано влияние технологических условий напыления в КО на структуру и электропроводность нелегированных слоёв CdTe на стеклянных и сапфировых подложках. При всех исследованных режимах технологии квазизамкнутого объема ($T_{\text{и}}=465\text{-}650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{п}}=50\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$) на стеклянных (неориентированных) подложках осаждались поликристаллические слои CdTe только кубической модификации (типа сфалерита). Использование в этих условиях ориентированных подложек изменяло не только степень кристалличности слоёв CdTe, но и их структурную модификацию.

Установлено, что на кристаллических подложках (0001)Al₂O₃ при температуре испарителя $T_{\text{и}}=505\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре подложки $T_{\text{п}}=485\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается рост в КО слоёв CdTe смешанной структуры с преобладанием гексагональной фазы (рис. 1, а). Электронограмма на отражение (рис. 1, в) свидетельствует о наличии в исследованных слоях CdTe гексагональной фазы, ориентированной преимущественно плоскостью (0001) параллельно плоскости (0001) α -Al₂O₃. С увеличением температуры сапфировых подложек до $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ при таком же перепаде температур на линии испаритель-подложка наблюдается рост пленок кубической модификации (рис. 1, б).

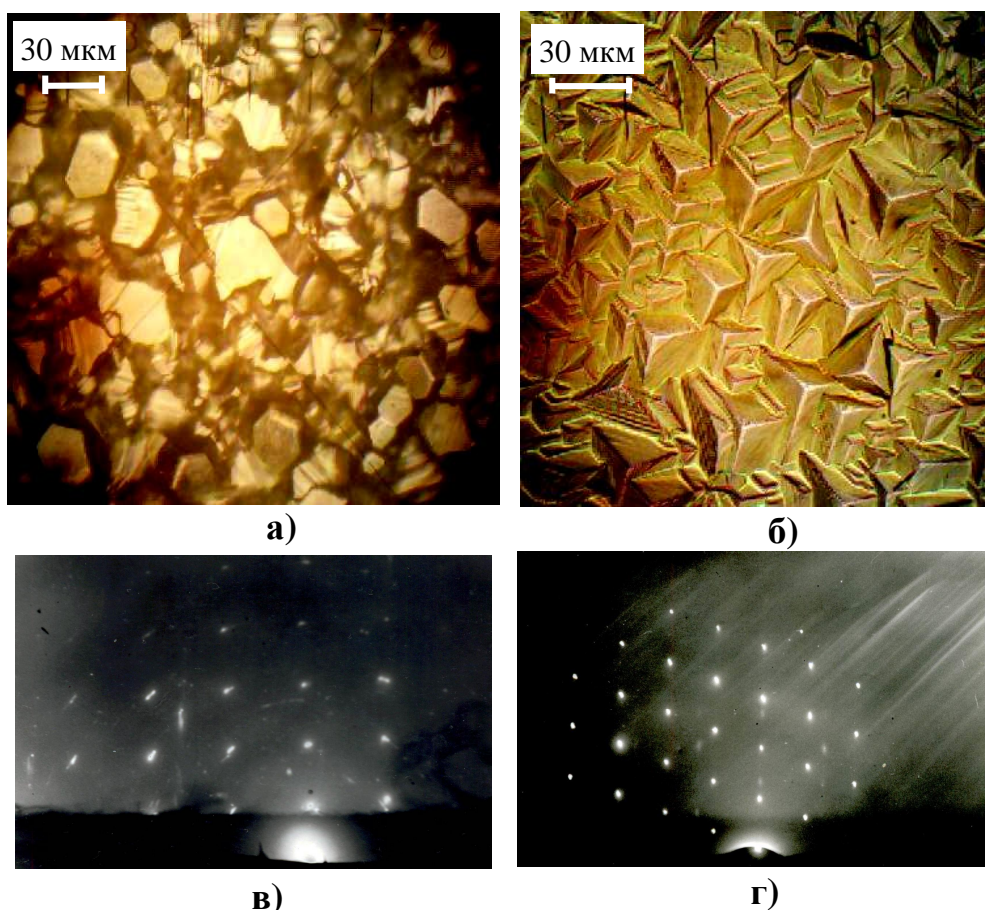


Рис. 1. Микрофотографии поверхности (а, б) и электронограммы (в, г) от слоёв CdTe толщиной 30 мкм, полученных напылением в КО на сапфировые подложки при температурах: а) $T_{\text{и}}=505\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{п}}=485\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $T_{\text{и}}=585\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{\text{п}}=565\text{ }^{\circ}\text{C}$

С ростом скорости поверхностной диффузии при увеличении $T_{\text{п}}$ адсорбированные атомы перестраиваются в более стабильную кубическую структуру. Согласно электронограмме (рис. 1, г), слои CdTe кубической фазы ориентируются преимущественно плоскостью (111) параллельно плоскости (0001) сапфировых подложек.

Найдены оптимальные режимы, обеспечивающие воспроизводимое выращивание в КО слоёв CdTe. Построена термическая диаграмма роста поликристаллических слоёв CdTe на стеклянных подложках.

Исследовано влияние температуры стеклянных подложек на скорость напыления $V_{\text{н}}$ слоёв CdTe (рис. 2), которая монотонно убывает с ростом $T_{\text{п}}$ для температур испарения матричного материала $T_{\text{и}} < 550$ °С. При $T_{\text{и}} \geq 550$ °С на зависимости $V_{\text{н}}(T_{\text{п}})$ наблюдается максимум. При $T_{\text{и}} = 550$ °С он соответствует $T_{\text{п}} = 450$ °С.

Установлен характер зависимости размеров кристаллитов от температуры стеклянных подложек и толщины слоёв CdTe. При фиксированной температуре испарения $T_{\text{и}} = 550$ °С рост слоёв CdTe на стеклянных подложках при $T_{\text{п}} < 400$ °С происходит в основном за счет увеличения количества кристаллитов, а в температурном интервале 400-480 °С – за счет увеличения размеров кристаллитов до значений 30 мкм.

Определена зависимость темновой электропроводности нелегированных слоёв CdTe от тепловых условий их получения на стеклянных подложках в интервале температур $T_{\text{п}} = 50 \div 480$ °С и $T_{\text{и}} = 475 \div 650$ °С. Удельное темновое сопротивление таких слоёв CdTe, полученных в технологических условиях $T_{\text{и}} = 550$ °С и $T_{\text{п}} = 450$ °С, достигает минимального значения

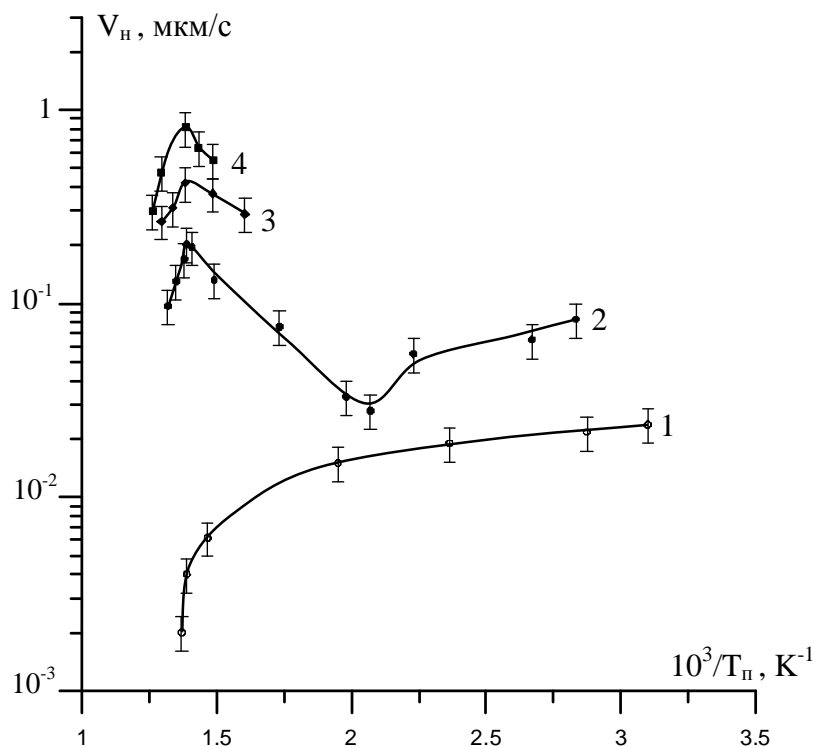


Рис. 2. Зависимость скорости напыления слоёв CdTe от температуры стеклянных подложек для различных температур испарения исходного материала, °С : 1 - 500, 2 - 550, 3 - 600, 4 – 650 и соответствующих плотностей потоков испаряемого материала, см⁻²с⁻¹ : 1 - $3,15 \cdot 10^{16}$, 2 - $1,3 \cdot 10^{17}$, 3 - $5,1 \cdot 10^{17}$, 4 - $2,1 \cdot 10^{18}$

$3 \cdot 10^6$ Ом·см. Этот режим использовался для получения легированных слоёв nCdTe:In для светоприёмных элементов ПЧФ.

Третья глава посвящена изучению влияния температуры соиспарения примеси индия на электрофизические свойства слоёв nCdTe:In как светоприёмной основы ПЧФ.

Установлено, что минимальное сопротивление слоёв nCdTe:In, составляющее при комнатной температуре $5 \cdot 10^3$ Ом·см, соответствует температуре соиспарения легирующей примеси $T_{л} \approx 470$ °С при $T_{и}=550$ °С и $T_{п}=450$ °С. Подвижность основных носителей заряда (электронов) достигает максимального значения $\mu = 3,5 \cdot 10^2$ см²/(В·с) при $T_{л} = 450$ °С (рис. 3, кривая 2), а их концентрация достигает насыщения ($n=3 \cdot 10^{13}$ см⁻³) при $T_{л} > 500$ °С (кривая 1). Это объясняется особенностями формирования в CdTe локальных центров на основе собственных дефектов и атомов индия. При $T_{л} < 450$ °С в слоях образуются преимущественно центры In_{Cd} , часть из которых при $T_{л} > 450$ °С формирует комплексы $(V_{Cd}In_{Cd})^-$ акцепторного типа, компенсирующие свободные центры мелких доноров In_{Cd} , обуславливающих электронную проводимость слоёв nCdTe:In при комнатной температуре.

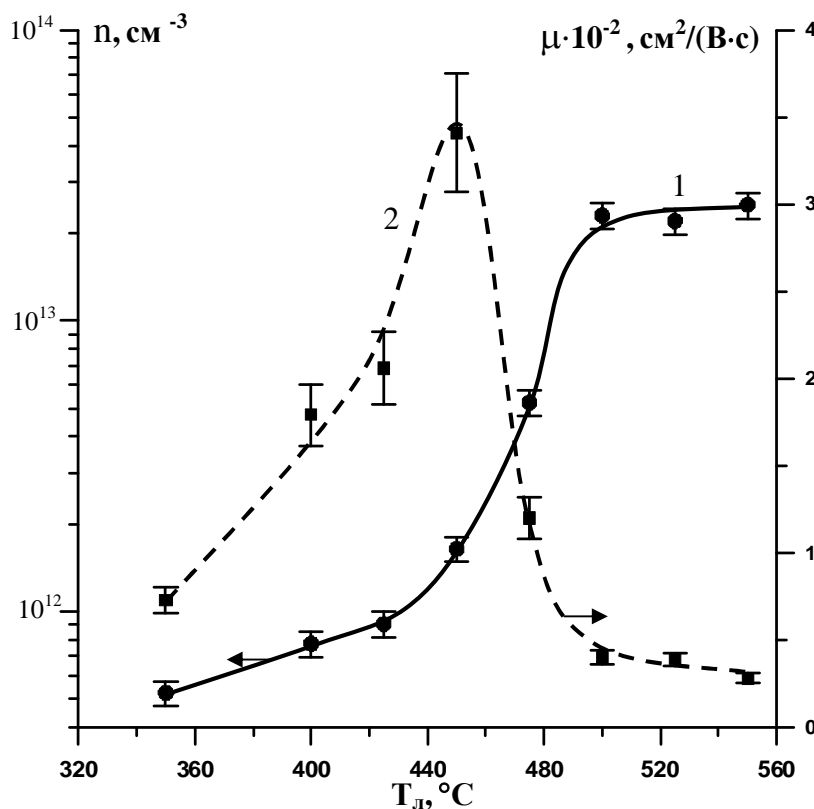


Рис. 3. Зависимость при 300 К концентрации (1) и холловской подвижности (2) равновесных носителей заряда (электронов) в слоях nCdTe:In, полученных при $T_{и}=550$ °С и $T_{п}=450$ °С, от температуры соиспарения легирующей примеси

Время жизни τ_n электронов в слоях nCdTe:In, полученных на стеклянных подложках при температурах $T_{и}=550$ °С и $T_{п}=450$ °С, достигает максимальной величины 0,5 мс, соответствующей температуре $T_{л}=475$ °С. Результаты зависимости $\tau_n = f(T_{л})$ анализируются на основе представления о том, что компоненты $(V_{Cd}In_{Cd})^-$ играют в слоях nCdTe:In роль очувствляющих центров акцепторного типа.

Легирование слоёв CdTe, осажденных при $T_{и}=550$ °С и $T_{п}=450$ °С, атомами индия приводит к смещению основного макси-

му спектральных характеристик их фототока в длинноволновую сторону спектра на величину, достигающую в слоях nCdTe:In, полученных при $T_{\text{д}} \geq 450$ °С, значения $\Delta E = 0,12$ эВ, соответствующего энергии ионизации комплекса $(V_{\text{Cd}}In_{\text{Cd}})^-$.

В четвёртой главе приводятся исследования ВАХ слоёв nCdTe:In в сильных электрических полях.

Исследованы ВАХ пленочных планарных структур In-nCdTe:In-In, поликристаллические слои nCdTe:In которых получались в тепловом режиме: $T_{\text{и}} = 550$ °С, $T_{\text{п}} = 300$ °С и $T_{\text{д}} = 450$ °С. Установлено, что до развития в них токовой неустойчивости перенос носителей заряда ограничивается межкристаллическими потенциальными барьерами высотой $e\Phi = 0,3$ эВ, располагаемыми вдоль линий тока на расстоянии ≈ 50 нм друг от друга. В сэндвич-структурах In-nCdTe:In-SnO₂, слои nCdTe:In которых получались в аналогичном тепловом режиме, до развития токовой неустойчивости перенос носителей заряда при напряжённостях электрического поля $E > 10^2$ В/см ограничивается объёмным зарядом инжектированных из In-контакта и захваченных ловушечным уровнем $E_t = E_c - 0,26$ эВ электронов с плотностью $N_t = 10^{14}$ см⁻³.

На ВАХ слоёв nCdTe:In в исследованной области температур $20 \div 120$ °С и напряженностей электрического поля $10^3 \div 10^4$ В/см наблюдается переключение S-типа (рис. 4). Переход в низкоомное состояние происходит скачком за время порядка 10^{-3} с. Последующие S-переключения слоёв nCdTe:In наблюдаются при меньших напряжениях (кривые 1, 2) с переходом после 4-5 циклов переключения в установившееся состояние (кривая 3). В этом состоянии пороговые параметры переключения (напряжение, ток) не меняются от цикла к циклу. Однако обратный ход ВАХ не совпадает с прямым ходом (ср. кривые 3, 4). В низкоомном состоянии ВАХ совпадают друг с другом и описываются зависимостью, близкой к $I \sim 1/U$. После выключения электрического поля образцы не восстанавливают свою первоначальную проводимость. В течение 8-10 суток они переходят в некоторое промежуточное состояние, в котором их сопротивление электрическому току больше, чем в установившемся состоянии. Однако оно меньше, чем в исходном состоянии. В переключенном низкоомном состоя-

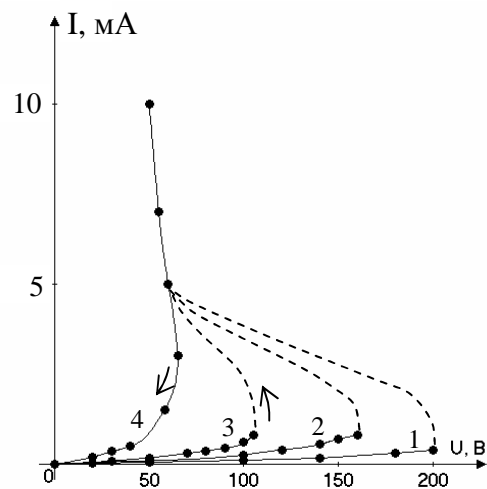


Рис. 4. Стационарные ВАХ образца In-nCdTe:In-In, снятые при 300К: 1 – первое переключение; 2 – второе переключение; 3 – переключение в установившемся состоянии; 4 – обратный ход ВАХ образца в установившемся состоянии

нии токопрохождение в слоях осуществляется за счет объемного шнурования.

На основе экспериментально установленных зависимостей мощности и порогового поля переключения от толщины и удельного сопротивления слоёв, а также от теплопроводности подложек обоснован тепловой механизм токовой неустойчивости в слоях nCdTe:In.

Установлено, что в исследованных образцах In-nCdTe:In-In и In-nCdTe:In-SnO₂ напряжение и ток переключения в стационарном режиме близки или совпадают с эффективными значениями переменных напряжений и токов переключения, что также свидетельствует о тепловом механизме S – переключения. На этой основе предложен способ отбора полупроводникового материала для тепловых переключающих элементов.

Параметрами переключения S-типа слоёв nCdTe:In можно управлять

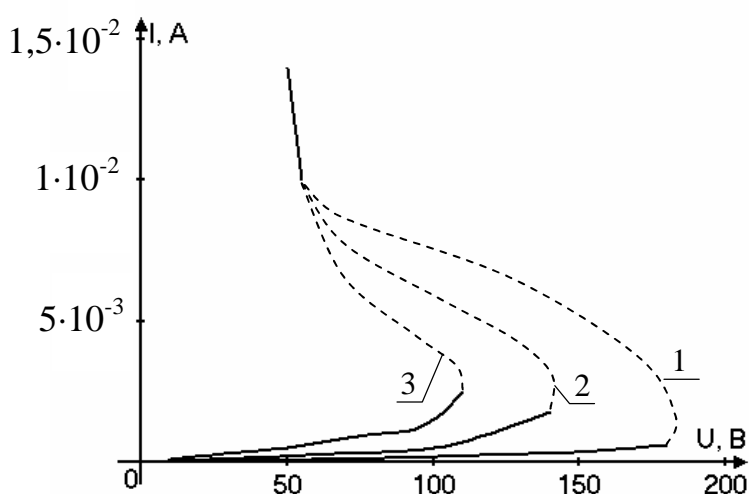


Рис. 5. ВАХ образца In-nCdTe:In-In, снятые при 300К для различных интенсивностей засветки интегральным светом, лк: 1 – 0; 2 – 280; 3 – 500

путем их возбуждения светом из спектральной области, соответствующей краю собственного поглощения CdTe (рис. 5). При этом напряжение переключения уменьшается с ростом интенсивности засветки. Ток переключения при этом возрастает так, что джоулева мощность переключения остаётся постоянной для различных уровней засветки. В низкоомном (переключенном) состоянии слои nCdTe:In становились не чувствительными к краевому излучению.

В пятой главе описана методика изготовления и характеристики ПЧФ на основе слоёв nCdTe:In, полученных в КО.

ПЧФ изготавливались на основе слоёв nCdTe:In, полученных методом вакуумного напыления в квазизамкнутом объёме на стеклянных подложках и кристаллических пластинах сапфира, ориентированных плоскостью (0001). Слои напылялись в форме диска толщиной $d \geq 10$ мкм и радиусом $R = 6 - 8$ мм. При изготовлении 4-х контактных ПЧФ на них наносились линейные индиевые контакты, располагаемые в вершинах квадрата. 5-ти контактные ПЧФ получались нанесением таких контактов на края диска, центральные углы которого составляют величины: 45° - между контактами 1 и 2, 2 и 3, 4 и 5; 90° - между контактами 3 и 4; 135° - между контактами 1 и 5 (см. вставку на рис. 7). Выходные характеристики 4-х контактных ПЧФ определяются величиной напряжения снимаемого с контактов, расположенных на диагонали

квадрата, а 5-ти контактных - напряжениями $U_{13}=U_X$ и $U_{34}=U_Y$. Они зависят от местоположения и интенсивности светового пятна, а также от величины входного тока. Входное сопротивление ПЧФ в зависимости от уровня легирования изменялось в пределах $0,5 \div 2$ МОм.

Выходной сигнал 4-х контактных ПЧФ nCdTe:In меняет знак при переходе оптического зонда от одного квадранта приемного элемента, образованного осями, проходящими через противоположные контакты, к соседнему. Характеристики чувствительности 4-х контактных ПЧФ nCdTe:In строились в виде полярных диаграмм. При их построении на радиус-векторах, проведенных из начала декартовых координат, связанного с центром фронтальной поверхности диска, под соответствующим углом откладывались в выбранном масштабе абсолютные значения выходного сигнала. Полярные диаграммы чувствительности 4-х контактных ПЧФ nCdTe:In, соответствующие круговому оптическому зондированию радиусом $r_0 \leq 0,7R$, представляют собой систему однолепестковых фигур с квадратной симметрией (рис. 6, кривая 1), соответствующий сигнал которых достигает максимального значения при засветке точек приемного элемента, находящихся на биссектрисах углов между осями. Они в основном коррелируют с теоретически рассчитанными характеристиками чувствительности 4-х контактных ПЧФ (кривая 2) как по форме, так и положению максимумов чувствительности. При оптическом зондировании радиусом $r_0 > 0,7R$ на полярных диаграммах чувствительности в каждом квадранте приемного элемента появляется по два идентичных максимума, которые с ростом r_0 смещаются к осям, соединяющим противоположные контакты. При засветке точек, находящихся на осях выходной сигнал равен нулю.

Установлена корреляция формы полярных диаграмм чувствительности 4-х контактных ПЧФ со степенью однородности слоёв nCdTe:In их фотоприёмных элементов. Однородные слои имеют более симметричные полярные диаграммы. На этой основе предложен способ неразрушающего контроля однородности полупроводниковых слоёв по составу и толщине.

Чувствительность 4-х контактных ПЧФ к положению светового зонда с высокой степенью точности можно объяснить влиянием электри-

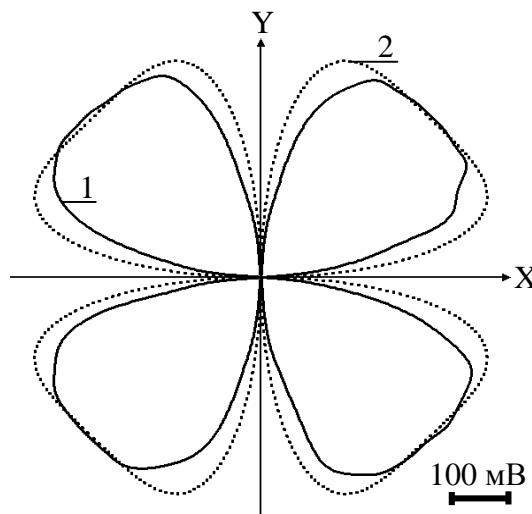


Рис. 6. Экспериментальная (кривая 1) и теоретически рассчитанная (кривая 2) полярные диаграммы чувствительности 4-х контактного ПЧФ на основе слоя nCdTe:In толщиной 30 мкм, полученного в технологических условиях $T_{и}=550$ °С, $T_{п}=450$ °С и $T_{л}=450$ °С, снятые при $T=300$ К и $r_{00} = 0,7$

ческого диполя, образующегося в области оптического возбуждения светоприёмного элемента под действием внешнего электрического поля. Его поле создаёт на выходных контактах дополнительную разность потенциалов. Расчёты, проведённые в рамках такого представления дали результаты, хорошо коррелирующие с экспериментальными данными.

На основе экспериментальных исследований показано, что 4-х контактные ПЧФ на основе однородных полупроводниковых слоёв $n\text{CdTe:In}$ могут использоваться как датчики углового и линейного смещений светоизлучающих объектов с удельной интегральной чувствительностью $0,63 \text{ В}/(\text{мкА}\cdot\text{мВт})$.

Исследование 5-ти контактных ПЧФ на основе слоёв $n\text{CdTe:In}$ показало, что зависимость выходного сигнала $U_X(x, y)$ является симметричной функцией относительно оси X (рис. 7). Область его линейного изменения с координатой локальной засветки представляет собой круг с центром фотоприёмного элемента и радиусом $r_0 = 0,33R$. Сигнал $U_X(x, 0)$ линейно изменяется в области координат $x/R = (-0,56 \div 0,56)$. Зависимость выходного сигнала $U_Y(x, y)$ является симметричной функцией относительно оси Y . Область линейного изменения выходного сигнала $U_Y(x, y)$ с координатой локальной засветки представляет собой круг с центром фотоприёмного элемента и радиусом $r_0 = 0,26R$. Сигнал $U_Y(0, y)$ изменяется линейно в области координат оптического зонда $y/R = (-0,75 \div 0,75)$.

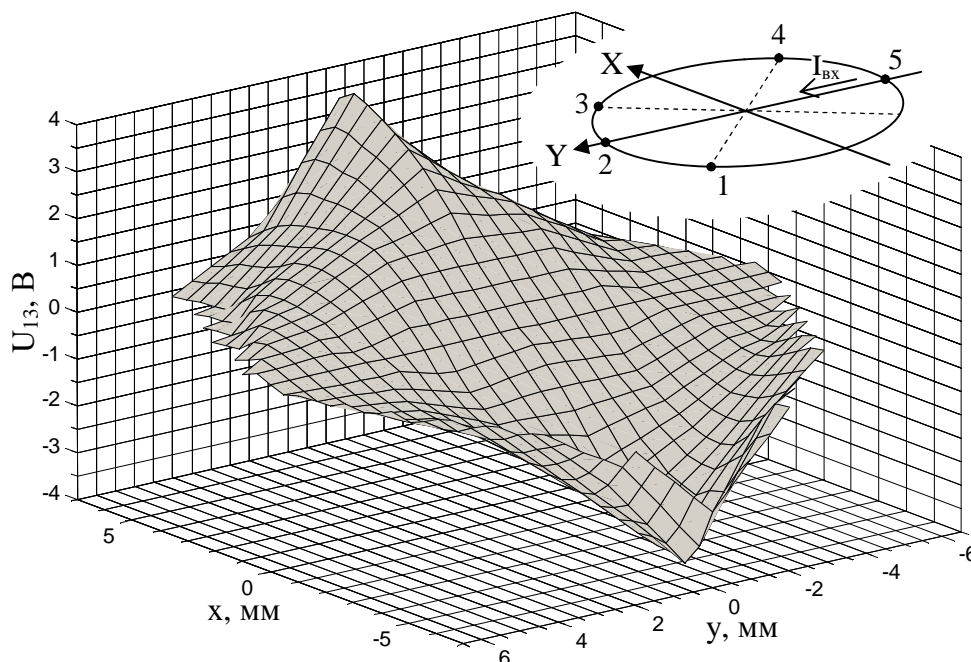


Рис. 7. Экспериментальная зависимость выходного напряжения U_{13} от координат x и y локальной засветки 5-ти контактного ПЧФ на основе слоя $n\text{CdTe:In} / \text{Al}_2\text{O}_3$ толщиной 30 мкм для $I_{\text{вх}} = 250 \text{ мкА}$ (на вставке приведены расположение контактов на светоприёмном элементе ПЧФ и направление входного тока)

Выявлено, что для создания приёмных элементов ПЧФ оптимальным является использование слоёв nCdTe:In с удельным темновым сопротивлением равным $10^4 - 10^5$ Ом·см. Величины выходных сигналов ПЧФ на основе слоёв nCdTe:In обратно пропорциональны их толщине и линейно возрастают с величиной входного тока и интенсивностью локальной засветки.

Установлено, что удельная координатная чувствительность 5-ти контактных ПЧФ, изготовленных на основе слоёв nCdTe:In, полученных в оптимальных технологических условиях, при облучении интегральным светом составляет величину $\eta = 172 \frac{\text{мВ}}{\text{мм} \cdot \text{мкА} \cdot \text{мВт}}$, а светом из области собственного краевого поглощения CdTe – $225 \frac{\text{мВ}}{\text{мм} \cdot \text{мкА} \cdot \text{мВт}}$.

В приложении приводятся копии диплома за лучший доклад на секции “физика” конференции МГУ “Ломоносов 2006”, патентов на изобретения и акта внедрения НИР.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. Исследованы технико-технологические условия получения термическим напылением в квазизамкнутом объёме на аморфных стеклянных и кристаллических сапфировых подложках легированных слоёв nCdTe:In как основы для светоприёмных элементов ПЧФ.
2. Установлена связь основных электрофизических параметров слоёв nCdTe:In с технологической температурой $T_{\text{л}}$ соиспарения In-примеси. Они в основном определяются особенностями формирования в CdTe локальных центров на основе собственных дефектов и атомов индия: при $T_{\text{л}} < 450$ °C в слоях образуются преимущественно центры In_{Cd} , часть из которых при $T_{\text{л}} > 450$ °C формирует комплексы $(V_{\text{Cd}}\text{In}_{\text{Cd}})^-$ акцепторного типа, компенсирующие свободные центры мелких доноров In_{Cd} .
3. На основании исследования ВАХ пленочных планарных структур In-nCdTe:In- In установлено, что до развития в них токовой неустойчивости S-типа перенос носителей заряда ограничивается межкристаллическими потенциальными барьерами высотой $e\Phi = 0,3$ эВ, располагаемыми вдоль линий тока на расстоянии ≈ 50 нм друг от друга.
4. На основании исследования ВАХ пленочных сэндвич - структур In-nCdTe:In- SnO_2 установлено, что до развития в них токовой неустойчивости S-типа перенос носителей заряда при напряженностях электрического поля $E > 10^2$ В/см ограничивается объёмным зарядом электронов, инжектированных из In-контакта и захваченных ловушечным уровнем $E_{\text{т}} = E_{\text{с}} - 0,26$ эВ с концентрацией $N_{\text{т}} \approx 10^{14}$ см⁻³.
5. В области температур $20 \div 120$ °C и напряженностей электрического поля $10^3 \div 10^4$ В/см на ВАХ слоёв nCdTe:In обнаружено и изучено переключе-

ние S-типа. На основе зависимостей мощности и порогового поля переключения от толщины, удельного сопротивления и температуры слоёв, а также от теплопроводности подложечного материала обоснован тепловой механизм токовой неустойчивости в слоях nCdTe:In. Параметрами переключения S - типа образцов nCdTe:In можно управлять путем их возбуждения светом из спектральной области края собственного поглощения CdTe.

6. Разработаны лабораторные макеты 4-х и 5-ти контактных ПЧФ на основе однородных полупроводниковых слоёв nCdTe:In с определённой схемой расположения и коммутации электрических контактов.
7. Показано, что 4-х контактные ПЧФ на основе однородных полупроводниковых слоёв nCdTe:In могут использоваться как датчики углового и линейного смещений светоизлучающих объектов с удельной интегральной чувствительностью $0,63 \text{ В}/(\text{мкА} \cdot \text{мВт})$, входным сопротивлением $0,5 \div 2 \text{ МОм}$ и линейной зависимостью выходных напряжений от входного тока и интенсивности локальной засветки фотоприёмного элемента.
8. Установлена корреляция формы полярных диаграмм чувствительности 4-х контактных ПЧФ со степенью неоднородности слоёв nCdTe:In светоприёмных элементов. На этой основе найдено техническое решение и зарегистрирован патент на изобретение “Способ неразрушающего контроля однородности полупроводниковых слоёв по составу и толщине”.
9. Предложена физическая модель, объясняющая координатную зависимость выходного сигнала 4-х контактного ПЧФ, основанная на представлении о возникновении под действием приложенного напряжения электрического диполя в области оптического возбуждения светоприёмного элемента nCdTe:In.
10. Показано, что 5-ти контактные ПЧФ на основе однородных полупроводниковых слоёв nCdTe:In в форме диска радиусом R могут использоваться как двухкоординатные датчики линейных смещений светоизлучающих объектов с максимальной чувствительностью $172 \frac{\text{мВ}}{\text{мм} \cdot \text{мкА} \cdot \text{мВт}}$ в области светоприёмного элемента радиусом $r_0 = 0,26R$, а как однокоординатные датчики линейных смещений светоизлучающих объектов - в области координат светового зонда $y/R = (-0,75 \div 0,75)$. Выходные сигналы U_x и U_y линейно возрастают с величиной входного тока и интенсивностью локальной засветки светоприёмных элементов nCdTe:In.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Функциональные возможности фотоприёмников на основе низкоомных полупроводниковых плёнок / А.А. Клюканов, Э.А. Сенокосов, В.В. Сорочан и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – №1. – С. 49-51.
2. Двухкоординатные фотодатчики на основе однородных проводящих полупроводниковых плёнок / А.А. Клюканов, Э.А. Сенокосов, В.В. Сорочан и др. // ЖТФ. – 2003. – Т. 73, вып. 5. – С. 123-125.
3. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В., Бурдиян И.И. Электрическая модель и свойства фотоприёмников на основе низкоомных полупроводниковых плёнок nCdTe // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Материалы III Международной научно-практической конференции. – Тирасполь, 2003. – С. 104-105.
4. Патент № 262 ПМР. Способ контроля качества полупроводниковой пленки / Э.А. Сенокосов, В.В. Сорочан, Л.Д. Цирулик. – 2004.
5. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В., Бурдиян И.И. Исследование эффекта электрического переключения в толстых слоях nCdTe:In // ABSTRACTS on BIT+ IV International Conference on Information Technologies. – Chisinau, 2004. – P. 159.
6. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Позиционно-чувствительные фотоприемники на основе слоёв nCdTe:In // Вестник Приднестровского университета. – 2004. – №1(19). – С. 13-16.
7. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В., Бурдиян И.И. Исследование эффекта электрического переключения в толстых слоях nCdTe:In // Вестник Приднестровского университета. – 2004. – №1(19). – С. 9-12.
8. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Выходные характеристики позиционно-чувствительных фотоприемников на основе слоёв CdTe:In // Вестник Приднестровского университета. – 2004. – №2(20). – С. 105-109.
9. Сенокосов Э.А., Макаревич А.Л., Сорочан В.В. Электрические переключатели на основе поликристаллических слоёв nCdTe:In, управляемые ИК-светом // Научная сессия МИФИ-2005: Сборник научных трудов. – 2005. – Т.1. – С. 86-87.
10. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В., Макаревич А.Л. Тепловая модель электрической неустойчивости с S-образными вольт-амперными характеристиками в слоях nCdTe:In // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Материалы IV Международной научно-практической конференции. – Тирасполь, 2005. – С. 103-104.
11. Патент № 298 ПМР. Способ отбора полупроводникового материала для тепловых переключающих элементов / Э.А. Сенокосов, В.В. Сорочан. – 2005.
12. Сенокосов Э.А., Макаревич А.Л., Сорочан В.В. Электрическая неустойчивость в слоях nCdTe:In с S –образными вольт - амперными характеристиками // Известия ВУЗов. Физика. – 2005. – №6. – С. 28-30.

13. Сенокосов Э.А., Макаревич А.Л., Сорочан В.В. Исследование механизма переключения в слоях nCdTe:In // Известия вузов. Электроника. – 2005. – № 6. – С. 41-45.
14. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Характеристики позиционно-чувствительных фотоприемников на основе слоёв nCdTe:In // Прикладная физика. – 2006. – №2. – С. 77-80.
15. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. О механизме электрического переключения S-типа в слоях nCdTe:In // Ломоносов-2006: Сборник тезисов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам. – М., 2006. – Т. 2. – С. 163-164.
16. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Позиционно-чувствительные фотоприемники на основе слоёв nCdTe:In // Ломоносов-2006: Сборник тезисов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам. – М., 2006. – Т. 2. – С. 162-163.
17. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Координатно-чувствительные фотоприемники на основе полупроводниковых слоёв nCdTe:In // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: Сборник трудов 5-й Всероссийской молодежной научной школы. – Саранск, 2006. – С. 130.
18. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Модель токопрохождения в слоях nCdTe:In до возникновения токовой неустойчивости // Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Тезисы V Международной конференции. – Тирасполь, 2007. – С. 107-108.
19. Сенокосов Э.А., Сорочан В.В. Позиционно-чувствительные фотоприёмники на основе однородных полупроводниковых слоёв // Социогуманитарные и естественнонаучные проблемы устойчивого развития: Приднестровье: Сб. статей. По РАЕН. – Издательство ПГУ, 2008. – вып. 2. – С. 87-96.

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сорочан Виталий Викторович

Исследование условий получения и характеристик позиционно-
чувствительных фотоприёмников на основе слоёв nCdTe:In

Подписано к печати 15.07.2008.

Печать офсетная. Формат бумаги 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 176.

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал
248600, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87