

На правах рукописи

КАШЕРИНИНОВ Петр Георгиевич

**Оптические регистрирующие среды на основе полупроводниковых
M(TI)S-структур с тунельно-тонким диэлектриком (TI).**

01.04.10- физика полупроводников

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2011г.

Работа выполнена в учреждении Российской академии наук в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор

Юрий .Михайлович.Таиров
ЛЭТИ им.В.И.Ленина

Доктор физико-математических наук
профессор

Рубен Павлович Сейсян
ФТИ им.А.Ф.Иоффе,

Доктор физико-математических наук,
Профессор

Дмитрий Анатолиевич Фирсов
СПбГПУ.С.-Петербург

Ведущая организация –Балтийский Государственный Технический
Университет ”Военмех”, Санкт-Петербург.

Защита состоится “20 “октября 2011г. на заседании диссертационного
совета Д 002.205.02 учреждения Российской академии наук Физико-
технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-
Петербург, Политехническая ул.,26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан “ “ 2011г

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба
высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря
диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

Общая характеристика работы

Актуальность темы: Оптические регистрирующие среды являются основой новых быстро развивающихся направлений науки и техники таких как: оптоэлектроника, робототехника, оптическая обработка информации, системы технического зрения, системы искусственного интеллекта, оптические компьютеры, системы навигации и т.д.

Регистрирующая среда это твердотельное устройство, способное быстро переносить оптическую информацию с одного светового потока на другой, усиливать изображение по яркости, преобразовывать их по спектру и когерентности, выполнять операции вычитания, дифференцирования и т. д. [1,2]. Для того чтобы перенести информацию с одного светового потока на другой, необходима оптическая среда, например, материал, свойства пропускания которого зависят от интенсивности записывающего светового потока или импульса. Светоуправляемые оптические логические элементы на базе этих регистрирующих сред представляют собой устройства, в которых один световой поток или импульс непосредственно управляет параметрами другого светового потока без промежуточного преобразования в электрический сигнал и обратно. В настоящее время используются два основных принципа функционирования оптических регистрирующих сред на полупроводниковых структурах:

1) за счет перераспределения напряженности электрического поля под действием записывающего света в двухслойных структурах на электрооптических кристаллах (модуляторы света на MIS-структурах типа "PROM" и модуляторы света на двухслойных структурах: фотопроводник-жидких кристаллах и структурах МДП-ЖК (MIS-LC) [3]),

2) за счет изменения характеристик среды под действием записывающего света, например, коэффициентов его преломления или поглощения (эффект оптической бистабильности) [5-13].

Эти принципы функционирования регистрирующих сред используются в оптической обработке информации уже в течение нескольких десятков лет, при этом постоянно совершенствуются параметры регистрирующих сред, функционирующих на основе этих принципов, увеличивается быстродействие светоправляемых оптических приборов, реализуемых на их основе. В настоящее время наибольшее быстродействие регистрирующих сред достигнуто на двухслойных структурах МДП-ЖК и составляет 10^2 - 10^3 цикл/с [6-14]. В то же время современной технике (системам технического зрения, искусственного интеллекта, оптических компьютеров и т.д.) необходимы устройства для обработки изображений с быстродействием на несколько порядков выше (до 10^6 цикл/с). Работы по совершенствованию параметров известных регистрирующих сред и разработке новых типов быстрых оптических регистрирующих сред интенсивно проводятся в мире. Для резкого увеличения быстродействия необходимы регистрирующие среды нового типа, работающие на принципах, отличных от используемых в настоящее время.

Целью работы является:

1–разработка новых физических принципов быстрой записи изображений на зарядах свободных фотоносителей в полупроводниковых структурах с быстродействием до 10^6 цикл/с.

2-разработка конструкции и технологии полупроводниковых структур для оптических регистрирующих сред, работающих на этих принципах на основе MIS-структур с тонким наноразмерным слоем диэлектрика (TI) толщиной 2-5 нм, (M(TI)S-структурах) с быстродействием до 10^6 цикл/с.

3-разработка на базе регистрирующих сред на M(TI)S-структурах новых типов быстрых светоправляемых приборов для (ВОЛС) и систем обработки изображений с быстродействием до 10^6 цикл/с:

- фотонные ключи для (ВОЛС) и цифровых оптических вычислителей на n-p(TI)M-структурах на кристаллах (CdTe, GaAs),
- фотодетекторы с оптически управляемой областью фоточувствительности,
- фотодетекторы для записи, измерения, и сравнения сигналов изображений,
- оптоэлектронные корреляторы изображений некогерентного света

Научная новизна

Научная новизна работы связана с изучением мало исследованного явления обратимой перестройки напряженности электрического поля в MIS-структурах с тонким наноразмерным диэлектриком (TI), ((M(TI)S-структура) при освещении на зарядах свободных фотоносителей при протекании сквозных фототоков монополярной инжекции.

Исследования включали:

- а) изучение пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в объеме M(TI)S-структур различной модификации при освещении, после включения (выключения) света:

- с варьируемой толщиной TI-слоя,
- на "чистых" и "компенсированных" высокоомных кристаллах,
- на кристаллах, содержащих n-p переход (n-p(TI)M-структуры)
- б) изучение воздействия фотостимулированной обратимой перестройки напряженности электрического поля в M(TI)S-структурах на фотоэлектрические характеристики структур:
 - на высокоомных "чистых" кристаллах (CdTe) с малой концентрацией примесных уровней ($N_t < 10^{13} \text{ см}^{-3}$),
 - на высокоомных "компенсированных" кристаллах CdTe, GaAs с

высокой концентрацией примесных уровней ($N_i > 10^{15} \text{см}^{-3}$).

1. Показано, что:

- фотоэлектрические характеристики M(TI)S-структур с наноразмерным слоем диэлектрика на высокоомных “чистых” кристаллах CdTe с малой концентрацией примесных центров ($N_i < 10^{13} \text{см}^{-3}$) полностью определяются явлением пространственно-временной перестройки напряженности электрического поля в кристалле такой структуры за счет зарядов свободных фотоносителей. Время установления зарядов в таких структурах соизмеримо с временем пролета носителей, распределение напряженности электрического поля в структуре не меняется со временем экспозиции.

- фотоэлектрические характеристики M(TI)S-структур на “компенсированных” кристаллах CdTe, GaAs с высокой концентрацией примесных уровней ($N_i > 10^{15} \text{см}^{-3}$) определяются как пространственно-временной перестройки напряженности электрического поля за счет зарядов фотоносителей, так и появлением дополнительных инжекционных токов в кристалл со стороны TI-слоя,

- появление инжекционных токов в таких структурах способствуют ограничению и стабилизации распределения напряженности электрического поля со временем при освещении, резкому уменьшению времени рассасывания записанного заряда на примесных уровнях после выключения освещения и увеличению быстродействия таких структур на “компенсированных” кристаллах.

2. Разработана оригинальная фотоэлектрическая методика обнаружения инжекционных токов в M(TI)S-структурах на “компенсированных” кристаллах при освещении, основанная на измерении термостимулированных токов (ТСТ) в таких структурах после их дозированного освещения.

3. Разработаны способы считывания изображений, записанных на зарядах фотоносителей в полупроводниковых M(TI)S и n-p(TI)M-структурах путем регистрации величины фототока на выходе структуры от действия считывающего светового потока, освещающего поверхность структуры со стороны TI-слоя при включенном записывающем световом потоке. Фототок от действия считывающего светового потока содержит информацию о величине и конфигурации записанного в кристалле n-p(TI)M-структуры изображения.

4. Результаты проведенных исследований позволили предложить новый способ оптической записи и считывания изображений в полупроводниковых M(TI)S и n-p(TI)M-структурах в виде распределенной плотности зарядов свободных фотоносителей в кристалле, быстро вытекающих из структуры после выключения записывающего светового потока, что исключает необходимость проведения операции стирания при перезаписи изображений и увеличивает их быстродействие до 10^6 цикл/с.

Практическая значимость результатов работы:

1. Разработана конструкция полупроводниковых структур для записи и считывания изображений на зарядах свободных фотоносителей на основе MIS-структур с тонким наноразмерным слоем диэлектрика (TI), (M(TI)S-структур)

2. Предложены и реализованы быстрые оптические регистрирующие среды на M(TI)S-структурах, содержащие n-p переход (n-p(TI)S-структуры) как на "чистых" кристаллах (CdTe) с малой концентрацией примесных центров ($N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$), так и на компенсированных кристаллах (CdTe, GaAs) с большой концентрацией примесных центров ($N_i > 10^{15} \text{ см}^{-3}$) для записи изображений с быстродействием до 10^4 – 10^6 цикл/с.

3. На n-p(TI)M-структурах предложены и реализованы нового типа быстрые светуправляемые приборы для волоконно оптических линий связи (ВОЛС) и систем оптической обработки изображений с быстродействием существенно превосходящим известные аналоги на структурах на жидких кристаллах (МДП-ЖК):

- светуправляемый оптический затвор,
- фотодетектор с оптически управляемой областью фоточувствительности,
- оптоэлектронный коррелятор изображений некогерентного света.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на XIII и XIV Международных конференциях по когерентной и нелинейной оптике (Минск 1988, Ленинград 1991; Международной конференции по электронным материалам (Страсбург 1992г.), Всесоюзных конференциях: "Физика и применение контакта металл-полупроводник" (Киев 1987); XI конференция по физике полупроводников (Кишинев 1989); конференция "Фотоэлектрические явления в полупроводниках (Ташкент 1989); I и II конференции по оптической обработке информации (Ленинград 1988, Фрунзе 1990), Конференция: Лазеры, Измерения, Информация. (Санкт-Петербург, 2002-2008г); Четвертый международный семинар "Российские технологии для индустрии" (С.Петербург, 2000); Fifth ISTC Scientific Advisory Committee Seminar, Nanotechnologies in the area of physics chemistry and biotechnology (St-Petersburg, Russia, 2002); Partnership Development in Russia/CIS, 2nd ISTS-Samsung forum, (Moscow 2003); 12 th International Symposium Nanostructures: Physics and Technology (St Peterburg, Russia 2004); Российское совещание по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника 2008, Новосибирск 2008) и др.

Личное участие автора явилось определяющим в разработке направления и получении научных результатов, изложенных в диссертации, где обобщены результаты исследований, проводимых автором с 1969 года.

Работа поддержана :

- научной Программой Европейского Сообщества INCO COPERNICUS-96 (Контракт № IC15-CT96-0808(DG 12-CDPE)) (1997-2000)),

-Федеральной целевой научно-технической программой: “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники (2002-2006г)”(Госконтракт 40.020.1.1.1157 по теме 01.40.01.08.02)

Результаты работы защищены 10 авторскими свидетельствами и тремя Патентами России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 71 наименования. Объем диссертации составляет 141 страниц печатного текста, в том числе 31 рисунок и 5 страниц цитируемой литературы

Научные положения, выносимые на защиту:

Положение1.

Освещение M(TI)S(TI)M-структур “собственным” светом приводит к существенному перераспределению напряженности электрического поля в кристалле. При этом в результате накопления свободных носителей в кристалле электрическое поле смещается к темновому электроду и может увеличиваться близи него более, чем на порядок..

Положение2

Время установления стационарного электрического поля в M(TI)S(TI)M-структурах при освещении определяется временем установления сквозного фототока в структуре и не зависит от времени экспозиции.

Положение3

После выключения освещения напряженность электрического поля в M(TI)S(TI)M-структурах возвращается к своему темновому значению благодаря наличию туннельно прозрачного диэлектрика (TI), позволяющего записанному заряду свободных носителей покидать структуру после выключения освещения за время единиц микросекунд.

Положение4

Определена прозрачность туннельной тонких диэлектрических слоев (TI) в M(TI)S(TI)M-структурах, изучено воздействие прозрачности (TI)-слоев на параметры приборов, реализованных на их основе (фотонные ключи, корреляторы изображений)

Положение5.

Освещение n-p(TI)M-структур с обратно смещенным n-p переходом сопровождается резким уменьшением (на порядок) напряженности поля в области n-p перехода и возрастанием поля на участке кристалла вблизи (TI) слоя

Положение6.

Запись изображений на n-p(TI)M-структурах на “чистых” кристаллах (CdTe, $N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) осуществляется на зарядах свободных фотоносителей с быстродействием до 10^5 - 10^6 цикл/с.

Положение 7

Сопоставление сравниваемых изображений с эталонным на n-p(TI)M-структурах осуществляется путем регистрации фототока, возникающего при освещении поверхности структуры со стороны TI-слоя сравниваемым изображением.

..

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, указана научная новизна и практическая ценность результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, приводится список конференций и семинаров, на которых докладывались результаты работы.

Первая глава диссертации носит обзорный характер, посвящена описанию существующих оптических регистрирующих сред, принципам их

функционирования, описанию их параметров и принципиальных недостатков.

В настоящее время известно два основных принципа функционирования оптических регистрирующих сред:

-за счет перераспределения напряженности электрического поля в двухслойных структурах на электрооптических кристаллах под действием записывающего светового потока: модуляторы типа ПРОМ на MIS-структурах и модуляторы на жидких кристаллах (LC) типа MIS-LC и др.),

- за счет изменения характеристик регистрирующей среды (коэффициентов ее преломления или поглощения) под действием записывающего света (эффект оптической бистабильности).

В настоящее время практическое применение нашли лишь регистрирующие среды на двуслойных структурах, представляющие собой сочетание электрооптический-неэлектрооптический слои с непроходимой для фотоносителей границей раздела между ними. Принцип оптической записи информации (изображений) в двухслойных структурах заключается в преобразовании энергии излучения записывающего светового потока в изменение энергии электрического поля в структуре под действием записанного электрического заряд в объеме кристалла. Наличие непроходимой для носителей тока границы раздела между электрооптическим- неэлектрооптическим слоями приводит к сохранению зарядового рельефа после окончания цикла ”запись-считывание“ и вызывает необходимость проведения операции стирания записанного заряда при перезаписи изображений, что уменьшает быстродействие структур. Известные оптические регистрирующие среды на двуслойных структурах и на эффекте оптической бистабильности не могут обеспечить высокую скорость обработки изображений

Для реализации быстрых регистрирующих сред необходимо разработать новые принципы быстрой оптической записи информации, нового типа структуры, работающих на этих принципах.

Вторая глава диссертации посвящена описанию принципов записи изображений на зарядах свободных фотоносителей в полупроводниковых MIS-структурах с тонким наноразмерным слоем диэлектрика (TI), (M(TI)S-структурах).

Структуры, в которых плотность записанного в кристалле электрического заряда повторяет с высокой скоростью интенсивность записывающего потока на поверхности структуры известны в полупроводниковой оптоэлектронике, но до последнего времени не использовались для записи изображений. Это MIS-структуры с туннельно тонким наноразмерным диэлектрическим слоем (TI), (M(TI)S-структуры) [20-44, 48,58,59,61,62]. Такие M(TI)S-структуры представляют собой поверхностно-барьерные фотодетекторы на высокоомных полупроводниковых кристаллах, в которых между металлом и поверхностью полупроводника существует промежуточный изолирующий слой (TI) толщиной (2-5нм), который носители тока преодолевают за счет механизма туннелирования [48,58,59,61,62]. Коэффициент прозрачности таких (TI) слоев D для носителей тока в M(TI)S-структурах много меньше единицы ($D=10^{-4}$ - 10^{-5}), их наличие уменьшает темновые токи структуры. В то же время фототоки короткого замыкания таких M(TI)S-структур практически не ослабляются (TI) слоем. Показано [62], что определяющую роль в механизме прохождения фототоков через этот (TI) слой играет накопление носителей тока в кристалле M(TI)S-структуры у границы с (TI) слоем. По мере увеличения их плотности увеличивается интенсивность процесса туннелирования носителей через TI -слои за счет увеличения частоты соударения со стенками этого барьера [48,62].

В стационарных условиях при малых потерях на рекомбинацию устанавливается такая концентрация электронов в потенциальной яме, при которой потоки носителей, уходящие в металл и поступающие в яму вследствие диффузии и дрейфа из области фотогенерации, равны друг другу. После выравнивания этих токов плотность записанного заряда перестает зависеть от времени экспозиции и определяется только интенсивностью записывающего света. Для каждой интенсивности освещения выравнивание фототоков происходит при определенной фиксированной плотности электрического заряда в кристалле за время соизмеримое с временем пролета носителей в структуре. Этот заряд и фототок существуют в кристалле только при включенном записывающем световом потоке. После выключения записывающего потока, записанный в кристалле заряд свободных фотоносителей вытекает из кристалла через TI слой за время единиц микросекунд. За это же время уменьшается до нуля и фототок. При проецировании изображений на поверхность M(TI)S - структуры в кристалле образуется двумерный электрический заряд с плотностью, повторяющей распределение яркости изображения на поверхности структуры и не зависящий от времени экспозиции [48,58,59,61,62].

В таких M(TI)S-структурах распределение плотности записанного заряда от сигнала изображения изменяется синхронно с изменением интенсивности освещения. В этих структурах отсутствует непроходимая для носителей тока граница раздела между слоями, что позволяет фотоносителям беспрепятственно покидать структуру после выключения записывающего освещения, восстанавливая исходное темновое распределение поля. За счет этого резко повышается быстродействие регистрирующей среды. Описывается конструкция таких структур, механизмы протекания в них сквозных фототоков, сопровождающихся появлением зарядов фотоносителей в кристалле на границе с TI-слоем.

При перезаписи изображений в таких $(M(TI)S)$ -структурах не требуется операции стирания записанного заряда. Запись изображений в таких структурах может осуществляться "собственным" светом, что определяет их высокую фоточувствительность ($I \ll 1 \text{ Вт/см}^2$).

Третья глава посвящена изучению фотоэлектрических характеристик $(M(TI)S(TI)M)$ -структур. Создание $M(TI)S$ -структур на высокоомных кристаллах с омическим контактом к кристаллу (S) вызывает значительные технологические трудности из-за сложности реализации хороших омических контактов к высокоомным кристаллам. Поэтому симметричные $(M(TI)S(TI)M)$ -структуры с двумя металлическими электродами (M) являются наиболее распространенным типом структур на широкозонных высокоомных кристаллах с туннельно прозрачными контактами (TI).

В таких структурах:

- освещение $M(TI)S(TI)M$ -структур "собственным" светом со стороны одного из электродов приводит к существенному перераспределению напряженности электрического поля в кристалле. При этом в результате накопления свободных носителей в кристалле электрическое поле смещается к темновому электроду и может увеличиваться близи него более, чем на порядок,

- время установления стационарного электрического поля в $M(TI)S(TI)M$ -структурах при освещении определяется временем установления сквозного фототока в структуре, не зависит от времени экспозиции и определяется прозрачностью (D) диэлектрических слоев (TI) в $M(TI)S(TI)M$ -структурах,

- после выключения освещения напряженность электрического поля в $M(TI)S(TI)M$ -структурах возвращается к своему темновому значению благодаря наличию туннельно-прозрачного диэлектрика (TI),

позволяющего записанному заряду свободных носителей покидать структуру после выключения освещения за время единиц микросекунд.

В М(ТИ)S(ТИ)М-структурах на высокоомных "чистых" кристаллах с малой концентрацией примесных уровней ($N_t < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) аккумулированный в кристалле около ТИ-слоев заряд определяется зарядом свободных фотоносителей [48,62]. Время установления стационарного заряда при этом соизмеримо с временем пролета носителей в структуре. Записанный заряд полностью стирается после выключения освещения за время ($t_{st} = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ с}$). При наличии в кристалле примесных уровней (N_t) аккумулированные около ТИ-слоев свободные фотоносители могут частично захватываться на них. При наличии большой концентрации таких уровней заряд захваченных носителей может значительно превосходить величину аккумулированного заряда свободных носителей, что обеспечивает более эффективную фотоиндуцированную перестройку поля в структурах на таких кристаллах [59]. Существенно, что освещение структуры сопровождается уменьшением высоты барьера металл-полупроводник за счет роста падения напряжения в слое диэлектрика (ТИ), что может вызвать надбарьерную инжекцию носителей в кристалл со стороны неосвещаемого электрода [48,59]. Различие в эффективности перестройки поля в М(ТИ)S(ТИ)М-структурах на кристаллах с различной концентрацией примесных уровней (N_t) при освещении обуславливает и существенное различие их фотоэлектрических характеристик. Один из механизмов воздействия перестройки поля на величину протекающего через структуру фототока – это изменение величины собранного на электроды заряда от каждой из созданных светом электронно-дырочных пар [48,59,63]. Под действием этого механизма при перестройке напряженности электрического поля в структуре при освещении происходит, как правило, уменьшение фототока со временем по сравнению с его значением при однородном

распределении поля в структуре [48,59]. Этот механизм преимущественно наблюдается в структурах на кристаллах с малой концентрацией примесных уровней ($N_t < 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Другой механизм связан с изменением инжекционных свойств контактов в приэлектродных областях структуры на "компенсированных" кристаллах ($N_t > 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и приводит к появлению тока инжекции во внешней цепи при перестройке поля [47,48,55]. Время рассасывания заряда, захваченного на примесные центры, после выключения записывающего света может быть очень большим, что делает невозможным использование структур на таких кристаллах для создания быстродействующих приборов. Однако в структурах на "компенсированных" кристаллах может быть выбран режим работы (приложенное напряжение U_0 , интенсивность освещения I_0 и т.д.), устраняющий эти нежелательные явления за счет появления в таких структурах токов инжекции со стороны электрода, противоположного освещаемому записывающим светом.[47,55]. Инжекции носителей в кристалл со стороны неосвещаемого электрода стабилизирует и ограничивает величину заряда на примесных уровнях вблизи этого электрода. После выключения освещения время рассасывания заряда на глубоких примесных уровнях будет уменьшаться за счет инжекции в кристалл носителей противоположного знака.

Таким образом, появления инжекционных токов в структурах на "компенсированных" кристаллах при оптической записи изображений приводит к ограничению и стабилизации величины заряда на примесных уровнях и к уменьшению времени рассасывания записанного заряда после выключения освещения. В результате этого быстродействие таких структур значительно возрастает.

Для исследования пространственно-временного распределения плотности электрических зарядов в кристалле таких структур при

освещении использовались электрооптические методики и установки [47,48,53,55,65], а сами M(TI)S(TI)M-структуры реализовывались на электрооптических высокоомных кристаллах (CdTe, GaAs).

С помощью разработанных электрооптических методик и установок [47,48,55] было проведено изучение пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в таких структурах на кристаллах CdTe при освещении. Используемая модификация поляризационно-оптического метода на поперечном эффекте Погекельса [65,48,55], позволяла определять распределение напряженности электрического поля $E=E(x,t)$ в абсолютных единицах в M(TI)S(TI)M-структурах на высокоомных электрооптических кристаллах с произвольной кристаллографической ориентацией и неизвестными значениями электрооптических коэффициентов, как в стационарных условиях, так и в различные моменты времени после включения (выключения) внешнего возмущения с высоким пространственным и временным разрешением. Проведено изучение распределения напряженности электрического поля в M(TI)S(TI)M-структурах на высокоомных “чистых” и “компенсированных” кристаллах CdTe при освещении. Разработана методика расчета фототоков в M(TI)S(TI)M-структурах при освещении структур запиывающим световым потоком при известном распределении напряженности электрического поля в кристалле. Из сопоставления экспериментально измеренных фотоэлектрических характеристик с рассчитанными на основании измеренного пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в кристалле оценивался вклад инжекционных токов в фотоэлектрические характеристики структур и увеличение быстродействия регистрирующих сред на их основе. Наибольшее быстродействие (10^5 - 10^6 цикл/с) наблюдается в (M(TI)S(TI)M)- структурах на высокоомных кристаллах (CdTe) с малой концентрацией примесных уровней ($N_i < 10^{13}$ см⁻³). В структурах на

высокоомных компенсированных кристаллах ($N_T > 10^{15} \text{ см}^{-3}$) быстродействие (ν) увеличивается при режимах работы структуры, обеспечивающих появление в структуре инжекционных токов со стороны темного электрода и достигает ($\nu = 10^4 - 10^5$ цикл/с). Такие структуры на компенсированных кристаллах (GaAs) перспективны для создания быстрых приборов для записи изображений.

В главе четыре описываются регистрирующие среды на p-r(TI)M-структурах (CdTe, GaAs). Это модификация M(TI)S-структур в виде пластинки кристалла с обратно-смещенным фоточувствительным p-r переходом на одной поверхности кристалла и тонким нано-размерным слоем диэлектрика на его противоположной поверхности (TI) под оптически прозрачным металлическим электродом (M). К структуре прикладывается напряжение в полярности обратно-смещенного p-r перехода. Запись двумерных изображений в регистрирующих средах на p-r(TI)M-структурах осуществляется записывающим потоком “собственного“ света, несущим записываемое изображение и освещающим структуру со стороны p-r перехода. При этом в кристалле структуры образуется двумерный электрический заряд с плотностью, повторяющей распределение яркости изображения на поверхности структуры и не зависящий от времени экспозиции [48,58,59,61,62]. Считывание записанных изображений в таких p-r(TI)M-структурах производится путем переноса записанной информации (электрического заряда) на считывающий световой поток “собственного“ света, однородно освещающего поверхность структуры со стороны TI-слоя при включенном записывающем световом потоке, несущем записываемое изображение. Фототок от действия считывающего светового потока содержит информацию о величине и конфигурации записанного в кристалле p-r(TI)M-структуры изображения. Таким образом, записывающий световой поток (со стороны p-r перехода) вызывает интенсивную перестройку

напряженности электрического поля в кристалле структуры за счет заряда записанного изображения, а считывающий световой поток не изменяя распределение напряженности электрического поля в кристалле, созданного записывающим светом, вызывает появление фототока от считывающего светового потока.

На базе оптических регистрирующих сред на n-p(TI)M-структурах реализованы светоуправляемые оптические логические элементы для оптических вычислителей, как цифровых так и аналоговых, с быстродействием на 2-3 порядка превышающих быстродействие логических элементов на широко известных регистрирующих средах на основе структур на жидких кристаллах (MIS-LC).

В пятой главе описываются фотонные ключи для цифровых оптических вычислителей на n-p(TI)M-структурах на кристаллах (CdTe, GaAs). Цифровые оптические вычисления нацелены на класс приложений, которые сейчас выполняются электронными компьютерами. Их преимущества: передача информации со скоростью света, замена проводных соединений оптическими связями. Фотонные ключи выполняются в виде специального типа полупроводниковой структуры, освещаемой двумя световыми потоками: управляющим и коммутируемым. Под действием управляющего потока в полупроводниковой структуре осуществляется оптическая запись информации в виде электрического заряда в кристалле в реальном времени (со скоростью ввода информации), а считывание записанной информации производится коммутируемым потоком, проходящим через структуру. При этом на коммутируемый световой поток на выходе структуры накладывается информация, записанная управляющим светом. Фотонный ключ работает на поперечном электрооптическом эффекте и представляет собой n-p(TI)M-структуру на высокоомном электрооптическом кристалле CdTe, GaAs, размещенную между двумя скрещенными поляризаторами.

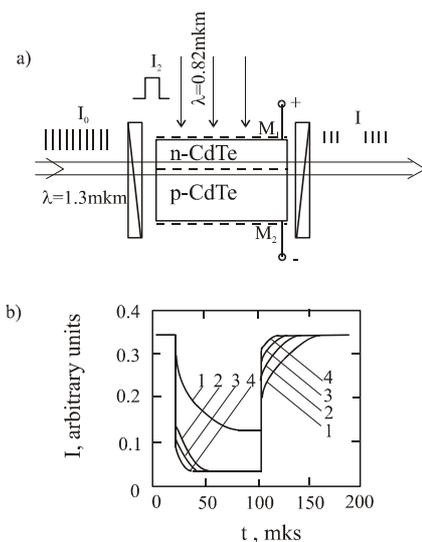


Рис.1. Фотонный ключ на n-p(TI)M-структуре на "чистом" высокоомном кристалле CdTe ($N_t < 10^{13} \text{ см}^{-3}$):

a) диаграмма освещения n-p(TI)M-структуры импульсами управляющего света (I_2) и постоянного коммутируемого светового потока (I_0)

b) осциллограмма пропускания коммутируемого потока (I_0) на выходе ключа при различной интенсивности управляющего светового импульса I_2 (мВт см^{-2}): 1- 0,5; 2-5.0; 3- 7.0; 4-9.0, ($U_0=400\text{В}$) [55].

Работа такого ключа осуществляется следующим образом: к структуре прикладывается напряжение (U_0) в полярности обратного смещенного n-p перехода. Коммутируемый световой поток ($\lambda = 1.0\text{--}2.0$ мкм) пропускается в кристалле перпендикулярно направлению электрического поля через область объемного заряда n-p перехода. Управляющий поток "собственного" света освещает поверхность

структуры со стороны n-p перехода параллельно направлению электрического поля. Фотонные ключи на таких структурах реализованы как на “чистых” кристаллах CdTe ($N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$), так и на “компенсированных” кристаллах CdTe, GaAs с высоким содержанием примесных центров ($N_i > 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Реализованный фотонный ключ на n-p(ГП)М-структуре на “чистом” кристалле CdTe ($\tau = 10^7 - 10^8$ Омсм, с концентрацией глубоких примесных уровней ($N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) имеет быстродействие $\tau = 10^5 - 10^6$ (цикл/с).

Определяющее воздействие на быстродействие фотонных ключей на n-p(ГП)М-структурах при оптической записи информации оказывают глубокие примесные уровни в кристалле. Проведено исследование возможности реализации фотонных ключей на компенсированных кристаллах (CdTe, GaAs) с высокой концентрацией глубоких примесных уровней ($N_i > 10^{15} \text{ см}^{-3}$) с быстродействием $\tau = 10^4 - 10^5$ (цикл/с).

Такие фотонные ключи являются универсальными чисто оптическими переключателями (свет управляет светом), могут найти применение в системах оптической обработки информации, оптических вычислительных устройствах, при реализации полностью оптических линий связи с оптической адресацией информационных сигналов.

В главе шесть описываются фотодетекторы для записи и сравнения изображений на n-p(ГП)М-структурах. Такие фотодетекторы предназначены для оптических аналоговых вычислений и способны за один такт обрабатывать двумерные картинку, причем машинная команда сама может представлять собой картинку. В них достигается высокое пространственное разрешение без разделения монокристалла полупроводника на отдельные элементы с использованием технологии фотолитографии. Фотодетекторы для аналоговых вычислений включают в себя:

-фотодетекторы с оптически управляемой областью фоточувствительности,

-фотодетекторы для записи, измерения, и сравнения сигналов изображений,

-оптоэлектронные корреляторы изображений некогерентного света

Фотодетектор со светоуправляемой областью фоточувствительности представляет собой фотодетектор, в котором записывающий световой поток управляет размером и конфигурацией его фоточувствительной поверхности для считывающего светового потока. Такой фотодетектор представляет собой n-p(TI)M-структуру на высокоомном кристалле (CdTe, GaAs) с мелким фоточувствительным n-p переходом на одной поверхности кристалла и слоем наноразмерного диэлектрика (TI) толщиной 2-5 нм между поверхностью кристалла и токосъемным металлическим оптически прозрачным электродом на другой его поверхности [45,49,52,53,57]. К n-p(TI)M-структуре прикладывается напряжение в полярности обратно-смещенного n-p перехода. Структура освещается одновременно записывающим световым потоком со стороны n-p перехода, содержащим записываемое изображение, и считывающим потоком со стороны TI-слоя. В отсутствии записывающего светового потока напряженность электрического поля в кристалле оказывается локализованным в области объемного заряда (ООЗ) n-p перехода, а напряженность поля в базовой области структуры (в кристалле на границе с TI-слоем) много меньше ее значения в (ООЗ) n-p перехода.

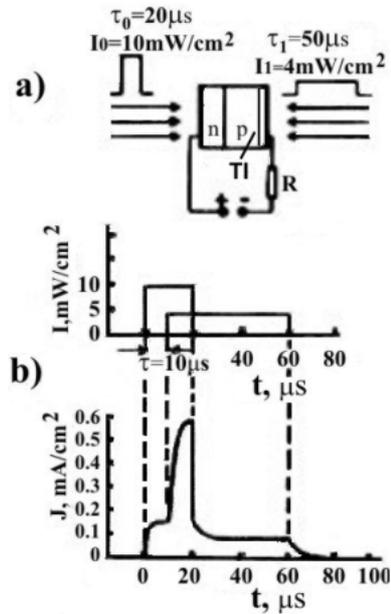


Рис.2. Фотодетектор на n-p(TI)M-структуре (CdTe) для регистрации и измерения сигнала изображения [53]:

а) диаграмма структуры и геометрии освещения,

б) временная диаграмма записывающего и считывающего световых импульсов и импульсов фототока на выходе фотодетектора ($d = 0,82 \text{ мкм}$) при времени сдвига между импульсами ($\tau = 10 \text{ мкс}$).

Под действием записывающего светового потока (со стороны n-p перехода) в кристалле структуры на границе с TI-слоем образуется распределенный электрический заряд свободных фотоносителей (дырок) с плотностью, повторяющей распределение яркости светового потока на поверхности n-p перехода. Под действием этого заряда происходит обратимая перестройка напряженности электрического поля в n-p(TI)M-структуре. Напряженность электрического поля в ООЗ n-p перехода уменьшается, а напряженность поля в кристалле на границе с TI-слоем увеличивается. Этот участок поверхности структуры становится

фоточувствительным для считывающего светового потока, падающего на поверхность структуры со стороны П-слоя. Размеры и конфигурация фоточувствительной области на поверхности структуры со стороны П-слоя повторяют размеры и конфигурацию поверхности структуры со стороны n-p перехода, освещаемой записывающим световым потоком. Фотоответ от считывающего потока мал в отсутствие записывающего светового потока, если диффузионная длина носителей в кристалле много меньше ширины базовой области кристалла (CdTe, GaAs) и резко возрастает при включении записывающего света.

На поверхность такого фотодетектора со стороны n-p перехода проецируется импульс записывающего "собственного" света, несущий записываемое изображение. На противоположную поверхность фотодетектора проецируется импульс считывающего "собственного" света, однородно распределенного по поверхности структуры или несущего изображение сравниваемого объекта. Частота следования этих импульсов одинакова. Когда записывающий световой импульс содержит записываемое изображение, а интенсивность света в считывающем импульсе однородна по площади образца импульс фототока на выходе фотодетектора от записывающего светового потока оказывается пропорционален площади записываемого изображения.

Коррелятор изображения некогерентного света.

Для решения задач обнаружения и распознавания объекта на сложном фоне наибольшее применение нашел корреляционный алгоритм. Распознавание объектов корреляционными ТВ-системами производится на основании сравнения видеосигналов от двух изображений одного и того же сюжета: эталонного изображения объекта, полученного заранее, и текущего изображения сравниваемого объекта. Для этого эталонное

изображение объекта, который должен быть опознан, проецируется на поверхность детектора со стороны n-p перехода импульсным светом.

Текущее изображение, содержащее изображение объекта и окружающего фона, проецируется световыми импульсами считывающего света на противоположную поверхность фотодетектора со стороны (П)-слоя [53]. При этом фотоответ на выходе процессора оказывается пропорционален интегралу от произведения интенсивностей световых потоков, инициированных эталонным и текущим изображениями, на площадь их перекрытия. Фотоотклик на выходе процессора определяется корреляционным интегралом [53,58,59].

Затем осуществляется взаимное смещение этих изображений по обеим координатам и их согласование по масштабу и угловой ориентации. Под действием эталонного изображения (со стороны n-p перехода) в кристалле фотодетектора производится фотоиндуцированная локальная перестройка напряженности электрического поля, изменяющая фотоответ фотодетектора от считывающего светового потока (со стороны (П) слоя). При этом сигнал на выходе фотодетектора будет определяться интегралом перекрытия этих изображений, т.е. будет пропорционален корреляционному интегралу (функции взаимной корреляции ВКФ эталонного и входного изображений). При совпадении эталонного изображения распознаваемого объекта и его текущего изображения по размеру и угловой ориентации значение ВКФ достигает максимального значения в пределе равного сигналу на выходе процессора от считывающего светового потока однородно распределенного по площади структуры при проецировании на структуру со стороны n-p перехода изображения эталонного объекта. Решение о наличии распознаваемого объекта в поле зрения системы принимается при превышении значением ВКФ заданного порога. Время вычисления корреляционного интеграла в предлагаемом корреляторе будет определяться быстродействием

фотодетектора и составлять 1.0-10.0 мкс, а сам процесс вычисления реализуется за один такт независимо от размерности (информативности) изображений.

Предлагаемый коррелятор изображений на полупроводниковых n-p(TI)M-наноструктурах:

- производит распознавание объектов путем параллельной обработки сигналов изображения в реальном времени (время сравнения изображений $t_c=1-10$ мкс),

- позволяет производить распознавание изображений объектов в некогерентном свете,

- может быть изготовлен на базе различного типа полупроводниковых кристаллах (GaAs, CdTe) по стандартным электронным технологиям.

- обладает универсальностью и простотой смены эталонных изображений,

- имеет малые габариты и энергопотребление.

Предлагаемый коррелятор изображений ориентирован на использование в интеллектуальных системах технического зрения, функционирование которых связано с необходимостью распознавания образов. Коррелятор может быть использован для решения следующих задач: автоматизированная сборка на конвейере, распознавание лиц и отпечатков пальцев, идентификация кредитных карт по фотографии и отпечатку пальца владельца, предотвращение несанкционированного доступа в специальные помещения, навигация и астронавигация летательных аппаратов по наземным ориентирам и звездам, автоматическая стыковка космических аппаратов и др.

Показана возможность создания коррелятора на n-p(TI)M-структуре на высокоомных "чистых" кристаллах CdTe ($N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) с быстродействием $= 10^5 - 10^6$ (цикл/с)

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1 Предложены принципы быстрой оптической записи изображений на высокоомных MIS-структурах с тонким наноразмерным слоем диэлектрика (TI), (M(TI)S-структурах) в виде распределенной плотности заряда свободных фотоносителей, появляющихся в кристалле структуры в процессе записи изображений при протекании сквозных фототоков монополярной инжекции.

2 Изучено явления фотоиндуцированной пространственно-временной перестройки напряженности электрического поля в M(TI)S-структурах различной модификации:

а) на "чистых" высокоомных кристаллах (CdTe) с малой концентрацией примесных уровней ($N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$),

б) на компенсированных высокоомных кристаллах CdTe, GaAs ($N_i > 10^{15} \text{ см}^{-3}$)

с) на M(TI)S-наноструктурах с варьируемой толщиной TI-слоя,

д) на кристаллах, содержащих p-n переход (n-p(TI)M-структуры).

3. Изучено воздействие перестройки напряженности электрического поля при освещении M(TI)S-наноструктур записывающим световым потоком на их фотоэлектрические характеристики, обнаружено появление инжекционных токов в M(TI)S-структурах на "компенсированных" кристаллах с высокой концентрацией примесных уровней ($N_i > 10^{15} \text{ см}^{-3}$), показано, что инжекционные токи способствуют уменьшению времени рассасывания записанного заряда после выключения освещения и повышению быстродействия структур

4. Реализованы оптические регистрирующие среды для записи изображений на зарядах свободных фотоносителей на M(TI)S-наноструктурах на "чистых" кристаллах CdTe с малой концентрацией примесных уровней ($N_i < 10^{13} \text{ см}^{-3}$) с быстродействием до 10^6 цикл/с.

5. Реализованы регистрирующие среды на M(TI)S-структурах на “компенсированных” кристаллах CdTe, GaAs ($N_i > 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в режимах работы, обеспечивающих протекания в них инжекционных токов с быстродействием 10^4 - 10^5 цикл/с.

6. Разработаны механизмы считывания записанных изображений в регистрирующих средах на n-p(TI)M-структурах

7. Предложен и реализован ряд быстрых светуправляемых приборов для волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и систем оптической обработки изображений на базе n-p(TI)M-структур:

- светуправляемый оптический затвор,
- фотодетектор с оптически управляемой областью фоточувствительности,
- оптоэлектронный коррелятор изображений некогерентного света.

Список публикаций по теме диссертации:

- K1 П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев, Л.В.Маслова. Исследование емкостных характеристик n-p переходов на CdTe. ФТП, 3, 4, 531-534 (1969).
- K2 В.П.Иванова, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Емкость n-p переходов на компенсированном CdTe. ФТП, 3, 7, (1969).
- K3 А.П.Богомазов, В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев, Р.С.Стецюк. Электрические свойства поверхностно-барьерных n-p переходов на высокоомном CdTe. ФТП, 4, 5 (1970).
- K4 В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Фотопамять поверхностно-барьерных переходов на CdTe. ФТП, 4, 5, 937-940 (1970).
- K5 В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Глубокие примесные уровни в кристаллах CdTe. ФТП, 4, 9, 1740-1744 (1970).
- K6 В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Фотоэлектретный эффект на полупроводниковых материалах. ФТП, 5, 1, 62-60 (1971).
- K7 В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Память фототоков n-p структур с глубокими центрами на CdTe к действию облучения. ФТП, 5, 7, 1458-1460 (1971).

- К8 Г.Д.Дмитриев, В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Фотоэлектрический эффект на низкоомных кристаллах CdTe при облучении γ -квантами Co^{60} . ФТП, 5, 12, (1971).
- К9. В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев. Поляризация n-p переходов на Ge под действием γ -облучения. ФТП, 6, 2 (1972).
- К10. В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, Л.Л.Маковский, О.А.Матвеев. Поляризация слоя объемного заряда n-p (n-i- p) детекторов при облучении. ФТП, 6, 2 (1972).
- К11. В.П.Карпенко, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев, А.А.Томасов. Определение параметров примесных центров методом перезарядки их электромагнитным излучением. ФТП, 7, 10, 1901-1907 (1973).
- К12. П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев, А.А.Томасов. Термическая диссоциация комплексов в полупроводниковых материалах. ФТП, 8, 3, 623-616 (1974).
- К13. П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев, А.А.Томасов. Образование ассоциации мелкий донор- глубокий акцептор в германии. ФТП, 8, 3, 799-900 (1974).
- К14 С.И.Затолока, П.Г. Кашерининов, О.А.Матвеев, Д.Г.Матюхин, А.А.Томасов, В.С.Хрунов. Природа низкотемпературной диссоциации комплексов в полупроводниковых материалах. ФТП, 9, 3, 580-583 (1975)
- К15. С.И.Затолока, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев Д.Г.Матюхин, А.А.Томасов, В.С.Хрунов. Влияние электрического поля на процесс объединения разноименно заряженных примесей в комплексы. . ФТП, 9, 3, 580-583 (1975).
- К16. Л.Г.Забелина, В.П.Крепкая, П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев, А.А.Томасов. Медь и кислород в кристаллах фосфида галлия, Электронная тех.сер.4, Электровакуумные и газоразрядные приборы, в.2 стр. 84-87 (1976).
- К17. С.И.Затолока, П.Г.Кашерининов, В.П.Карпенко О.А.Матвеев, Д.Г.Матюхин, А.А.Томасов, В.С.Хрунов. Определение ширины области поля в полупроводниковых кристаллах ФТП 13, 9, 1681-1687 (1979).
- К18. П.Г.Кашерининов, О.А.Матвеев Д.Г.Матюхин. Определение произведения ($\mu\tau$) в полуизолирующих кристаллах теллурида кадмия. ФТП 13, 7, 1288-1292 (1979).
- К19. П.Г.Кашерининов, Д.Г.Матюхин. Объемные поляризационные заряды в полуизолирующих кристаллах теллурида кадмия. ФТП 14, 5, 874-881 (1980).
- К20. П.Г.Кашерининов, Д.Г.Матюхин, В.А.Сладкова, Природа нелинейности люксамперных характеристик МПМ структур на полуизолирующих кристаллах теллурида кадмия. ФТП 14, 7, 1293-1300 (1980).

- K21 П.Г.Кашерининов, В.А.Сладкова. Природа отрицательной проводимости (ИК гашения) в высокоомных полупроводниковых кристаллах. ФТП 14, 9,1739-1746. (1980).
- K22. П.Г.Кашерининов. Особенности распределения напряженности электрических полей в детекторах на основе МПМ (МДПДМ) структур при регистрации излучения. ФТП 15,10,1888-1894 (1981)
- K23.А.А.Томасов, О.А.Матвеев, П.Г.Кашерининов. Влияние эффекта обратной диффузии носителей заряда на энергетический спектр мягкого рентгеновского излучения в полупроводниковых детекторах. ФТП 15, 11,2097-2102. (1981)
- K24. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, Ю.Н.Перепелицын, Ю.О.Семенов, И.Д.Ярошецкий.
Светоуправляемые оптические элементы для оптической обработки информации и ВОЛС. Электросвязь, 10, 37-39 (1990).
- K25. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, Ю.Н.Перепелицын, В.Е.Харциев, И.Д.Ярошецкий. Фотоэлектрические явления в полупроводниковых структурах с фоточувствительным распределением электрического поля и оптоэлектронные приборы на их основе.
Часть I С.-Пб: Препринт ФТИ-1569. 1991 59стр
Часть II С.-Пб: Препринт ФТИ-1570. 1991 62стр
- K26. P.G.Kasherininov, A. V.Kichaev and other. Photon switchers based on nonlinear electric field redistribution. SPIE Proceedings, Nonlinear Optics II-1992-v.1626 p. 66-72. (1992)
- K27. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, С.Л.Кузьмин, В.Е.Харциев, И.Д.Ярошецкий. Светоуправляемые оптические коммутационные приборы на высокоомных полупроводниковых структурах. Письма в ЖТФ,19,9, 55-58 (1993).
- K28. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, И.Д.Ярошецкий. Распределение напряженности электрического поля в высокоомных М(ТД)П(ТД)М структурах при освещении. Письма в ЖТФ,19,17,48-53 (1993).
- K29. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, С.Л.Кузьмин, М.М.Мездрогина, И.Д.Ярошецкий. Быстрые нелинейные оптические среды на гетероструктурах электрооптический-неэлектрооптический кристалл (CdTe- α Si). . Письма в ЖТФ, 19,9,47-50 (1993).
- K30. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, В.Е.Харциев, И.Д.Ярошецкий. Полупроводниковый фотоприемник со светоуправляемой фоточувствительной областью. Письма в ЖТФ,19,9, 51-54 (1993).
- K31. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, А.А.Томасов, И.Д.Ярошецкий. Фотоэлектрические явления в структурах с границей раздела полупроводник-тонкий слой диэлектрика на высокоомных "чистых" кристаллах. Письма в ЖТФ, 20,18, 16-21 (1994).
- K32 П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, И.Д.Ярошецкий. Фотоэлектрические явления в высокоомных структурах с границей раздела

- полупроводник-тонкий слой диэлектрика на высокоомных компенсированных кристаллах. ЖТФ, 65,8 (1995).
- К33. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, А.А.Томасов. Фотоэлектрические явления в структурах на высокоомных полупроводниковых кристаллах с тонким слоем диэлектрика на границе полупроводник-металл. ФТП, 29,11, 2092-2107 (1995)
- К34. П.Г.Кашерининов, А.Н.Лодыгин, Новые полупроводниковые приборы для регистрации энергии (дозы) электромагнитных и ядерных излучений на основе специального типа структур металл-диэлектрик-полупроводник./ Письма в ЖТФ, 1997, том 23, вып. 4, стр 23-29.
- К35. Кашерининов П.Г., Лодыгин А.Н./ Дозиметр для оперативного контроля энергии (дозы) ядерных излучений на структуре металл (М)-газовый диэлектрик (ГД)-полупроводник (П) (М(ГД)П). Письма в ЖТФ, 1998, том 24, № 22, стр. 64-69.
- К36. П.Г.Кашерининов, А.Н.Лодыгин, С.С.Мартынов, В.С.Хрунов.. Неполяризующиеся детекторы излучений на основе монокристаллов широкозонных полупроводников./ ФТП, 1999, том 33, вып.12, стр.1475-1478.
- К37. А.Д.Бондарев, П.Г.Кашерининов, А.Н.Лодыгин, С.С.Мартынов, В.С.Хрунов/ Периодический пробой газового слоя в структуре металл-газовый диэлектрик-полупроводник-металл при стационарном освещении структуры /Письма в ЖТФ, 2000, том 26, вып 3, стр.67-72.
- К38. Kasherininov,PG; Lodygin,AN; Sokolov,VK "Real-time optoelectronic image correlators based on semiconductor structures",in Proceedings of SPIE Vol.5066) Lasers for Measurements and Information Transfer 2002, edited by E.Privalov, (SPIE,Bellingham,WA,2003, p: 273-280
- К39.Кашерининов,ПГ; Лодыгин,АН; Тарасов,ИС "Полупроводниковые преобразователи непрерывного лазерного излучения в импульсное излучение" Письма ЖТФ, 2003, т.29, 21 страницы: 17-21
- К40 П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, В.И.Корольков, В.К.Соколов, Ф.Ю.Солдатенков, А.А.Томасов "Фотодетекторы с оптически управляемой областью фоточувствительности на наноструктурах на основе GaAs и CdTe" Конференция: Лазеры, Измерения, Информация. Санкт-Петербург, 7-8 июня 2006г. доклад, Тезисы доклада стр.73-74,
- К41. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев, А.Н.Лодыгин, А.А.Томасов, В.К.Соколов "Быстрые фотонные ключи на основе полупроводниковых наноструктур" Конференция: Лазеры, Измерения, Информация. Санкт-Петербург, 8-9 июня 2005г. доклад, Тезисы доклада стр. 80-81
- К42. П.Г.Кашерининов "Полупроводниковый фотодетектор для интеллектуальных систем" IWRFR-2000. Четвертый международный

- семинар "Российские технологии для индустрии", Санкт-Петербург, 29-31 мая, 2000, Сборник тезисов, стр 194-195
- К43. П.Г.Кашерининов, А.В.Кичаев "Светоуправляемые оптические переключатели на полупроводниковых структурах для оптических линий связи" IWRFRI-2000. Четвертый международный семинар "Российские технологии для индустрии", Санкт-Петербург, 29-31 мая, 2000, Сборник тезисов, стр 196-197.
- К44. П.Г.Кашерининов, А.Н.Лодыгин" Полупроводниковые детекторы-дозиметры для одновременного оперативного измерения интенсивности и энергии (дозы) электромагнитных, рентгеновских и гамма излучений на широкозонных изолирующих кристаллах." " IWRFRI-2000 . Четвертый международный семинар "Российские технологии для индустрии", Санкт-Петербург, 29-31 мая, 2000, Сборник тезисов, стр 198-199.
- К45. P.G.Kasherininov, A.N.Lodygin, V.K.Sokolov "Real time optoelectronic image correlators on the base of semiconductor structures with a nano-dimensional dielectric layer", Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology, Fifth ISTC Scientific Advisory Committee Seminar, St-Petersburg, Russia, May 27-29, 2002, ABSTRACTS, p 118-119
- К46. P.G.Kasherininov, A.N.Lodygin, V.K Sokolov, "Real time optical information recording on semiconductor nano-structures", Partnership Development in Russia/CIS, 2nd ISTS-Samsung forum, October 13-14, 2003 Moscow, Abstracts, p2
- К47. Kasherininov, PG; Kichaev, AV; Lodygin, AN; Sokolov, VK "Real-time optical information recording on semiconductor nanostructures" Lasers for Measurements and Information Transfer 2003 Proc. SPIE, v.5381, 1, p. 292-301. 2004 SPIE ISSN: 0277-786X
- К48. Kasherininov, PG; Lodygin, AN; Sokolov, VK " Detectors based on wide-gap insulating crystals for registration of intensive beams of nuclear, x-ray and electromagnetic radiation" Lasers for Measurements and Information Transfer 2004 Proc. SPIE, v.5447, p.346-356 2005 SPIE ISSN: 0277-786X
- К49. P.G.Kasherininov, A.N.Lodygin and V.K.Sokolov "Semiconductor nanostructures for creation number of new types light controlled high speed operation optoelectronic devices" 12th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", 2004, p.184-186)
- К50. Кашерининов, ПГ; Кичаев, АВ; Корольков, ВИ; Лодыгин, АН; Солдатенков, ФЮ
Быстрые фотонные ключи на наноструктурах на основе арсенида галлия: Письма ЖТФ, т.32, 9, 7-17 (2006)
- К51. P.G.Kasherininov, A.V.Kichaev, A.N.Lodygin, A.A.Tomasov, V.K.Sokolov "Fast photon switches on semiconductor nanostructures" Laser

- for Measurements and Information Transfer 2005, edited by Vadim E.Privalov, Proceedings of SPIE Vol 6251, p. 327-337 (SPIE, Bellingham, WA, Apr 2006)
- K52. P.G. Kasherininov , A.V.Kichaev, A.A.Tomasov, V.K. Sokolov “Photodetectors for fast images recognition on structures with Shottky barriers” Laser for Measurements and Information Transfer 2006, edited by Vadim E.Privalov, Proceedings of SPIE Vol. 6594, p. 65941G (SPIE, Bellingham, WA, Jan 2007)
- K53. P.G.Kasherininov, A.A.Tomasov, “High-efficiency optical analog computers of incoherent light on semiconductor nanostructures” Конференция: Лазеры, Измерения, Информация. Санкт-Петербург, 7-8 июня 2007г. доклад, Тезисы доклада стр.75-76,
- K54. P.G.Kasherininov, A.A.Tomasov, “High-efficiency optical analog computers of incoherent light on semiconductor nanostructures” Laser for Measurements and Information Transfer 2007, edited by Vadim E.Privalov, Proceedings of SPIE: Proc. SPIE Vol. 7006 p.7006OK (SPIE, Bellingham, WA, J 2008
- K55. П.Г.Кашерининов, А.А.Томасов “Высокопроизводительные оптические процессоры для оптических аналоговых компьютеров некогерентного света с параллельной обработкой изображений на полупроводниковых наноструктурах” Письма в ЖТФ, 34, 8, стр.68-76, (2008)
- K56. П.Г.Кашерининов, А.А.Томасов. Быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах для записи и обработки изображений ФТП, 42, 11, 1391-1399 (2008)
- K57. P.G.Kasherininov, A.A.Tomasov, “High-efficiency optical analog computers of incoherent light on semiconductor nanostructures” Laser for Measurements and Information Transfer 2007, edited by Vadim E.Privalov, Proceedings of SPIE: Proc. SPIE Vol. 7006OK p. (SPIE, Bellingham, WA, J 2008),
- K58. **Патент на изобретение N 2250159. Фотодетектор**
 Патентообладатель:Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН. Приоритет от 15.02.1999. Авторы изобретения: Кашерининов Петр Георгиевич, Лодыгин Анатолий Николаевич, Хрунов Владимир Семенович, Мартынов Станислав Семенович, Кашерининова Руслана Сергеевна. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, г. Москва, 27 мая 2000г.
- K59. **Патент на изобретение N 2250130. Способ регистрации излучения**
 Патентообладатель:Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН. Приоритет от 15.02.1999. Авторы изобретения: Кашерининов Петр Георгиевич, Лодыгин Анатолий Николаевич, Хрунов Владимир Семенович, Мартынов Станислав Семенович, Кашерининова Руслана

Сергеевна. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, г. Москва, 27 мая 2000г.

- К60. **Патент на изобретение** N 2212054. **Оптический коррелятор**. Патентообладатель: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН. 25.03.2002. Авторы изобретения: Кашерининов Петр Георгиевич, Лодыгин Анатолий Николаевич, Соколов Владимир Константинович. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации, г. Москва, 10 сентября 2003 г.
- К61. Кашерининов П.Г, Томасов А.А, Берегулин Е.В “Быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах для записи изображений на зарядах свободных фотоносителей” ФТП, 2011, том 45, выпуск 1, с 3-22

Цитируемая литература

1. Moore G.E. “Progress in digital integrated electronics” //IEEE IEDM Tech. Dig., 1975, P. 11-13.
2. Meindl J.D. “Low power microelectronics: retrospect and prospect” //Proc. IEEE, 1995, V. 83, P. 619-635.
3. Васильев А.Ф., Касасент Д, Кампанец И.Н, Парфенов А.В. Пространственные модуляторы света. М., Радио и связь, 1987, 320.
4. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л., Наука, 1983, 269.
5. Шварц К.К, Готлиб В.И, Кристопсон Я.Ж. Оптические регистрирующие среды, Издательство ”ЗИНАТНЕ” Рига 1976, 184.
6. Думаревский Ю.Д., Ковтонюк Н.Ф., Савин А.И. Преобразование изображений в структурах полупроводник — диэлектрик. — М.: Наука, 1987. — 176 с.
7. Ковтонюк Н.Ф., Сальников Е.Н. Фоточувствительные МДП приборы для преобразования изображений.- М.: Радио и связь.- 1990.-122 с.
8. Ковтонюк Н.Ф., Сальников Е. Н. Фоточувствительные МДП—ЖК структуры для преобразования изображений. — М.: Радио и связь, 1990. — 158 с.
9. Борошнев А.В., Ковтонюк Н.Ф.// Прикладная физика, 2000, Т.6. С. 5-10
10. Физические свойства жидкокристаллических веществ. — М.: Мир, 1982.,196 с.
11. Беляев В.В., Ковтонюк Н.Ф., Купрейченко В. С., Одинокое С. Б., Савин А.И., Чигринов В. Г. // ДАН СССР. 1989. т. 306. № 6. с 1372—1374.
12. Думаревский Ю.Д., Земсков К.И., Казарян М.А., Ковтонюк Н.Ф., Петраш Г.Г., Савин А. И. // ДАН СССР, 1987. т. 292. № 3. с. 604—607.
13. Ковтонюк Н. Ф., Костюк А. В. // ДАН СССР, т. 306. № 3. с. 609—612.

14. Ковтонюк Н. Ф., Борошнев А.В., Клюкин А.Л., Соколов А.В. Жидкокристаллический дисплей с ПВМС// Оптический журнал, 1993. № 7. С. 74—77.
15. Гиббс Х, Оптическая бистабильность. М., “Мир”, 1988.
16. Gibbs H.M., Tarnag S.S., Jewell J.L. et al., “Optical bistability in semiconductor etalons”, Workshop on Optoelectronics, La Jolla, California, 1982, March 23.
17. Gibbs H.M., Tarnag S.S., Jewell J.L. et al.// Appl.Phys. Lett. 1982, 41, 221.
18. Chemla D.S., Niller D.A.B., Smith P.W. et al, “Large optical nonlinearities in room-temperature GaAs-GaAlAs multiple quantum well structures”, Conference on Laser& Electrooptics Technical Digest, 1982, IEEE, New York.
19. Днепровский В.С, // УФН, 2008, вып.7 с. 18
20. Green M.A. and Shewchun J.// Solid State Electronics, 1974,v.17, N 4, P. 349-365.
21. Green M.A, Temple V.A.U., Shewchun J // Sol. St. Electron., 18, 745 (1975).
22. Green M.A, King F.D, Shewchun J// Sol. St. Electron., 17. 55 (1974).
23. Shewchun J, Clarce R.A,/. Sol. St. Electron., 16, 213 (1973).
24. Yamamoto T, Morimoto M// Appl. Phys. Lett., 20, 269 (1972).
25. Badry A.El, Simmons J.G// Sol. St. Electron., 20, 963 (1977).
26. Вуль А.Я, Зинчик Ю.С, Козырев С.В, Санин К.В., Федоров В.И, Шмарцев Ю.В // Письма ЖТФ, 5, 1274 (1979).
27. Малахов Б.А, Покалякин В.И, Степанов Г.В// Микроэлектроника, 9, 131 (1980).
28. Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И.// ФТП. 1981. Т. 15. В. 1 С. 142-148
29. Вуль А.Я, Федоров В.И, Бирюлин Ю.Ф, Зинчик Ю.С., Козырев С.В., Сайдашев И.И., Санин К.В.// ФТП, 15, 525 (1981).
30. Саченко А.В, Крупнова И.В.// ФТП, 15, 73 (1981).
31. Саченко А.В, Крупнова В.И, Снитко О.В.// Поверхность, 8, 41 (1982).
32. Герасимов А.Д, Гуткин А.А, Седов В.Е.// ФТП, 14. 26 (1980).
33. Герасимов А.Д, Гуткин А.А, Седов В.Е.// ФТП, 14, 550 (1980).
34. Вуль А.Я, Дидейкин А.Т, Зинчик Ю.С, Санин К.В.// Письма ЖТФ, 9(1983).
35. Вуль А.Я, Санин К.В, Федоров В.И, Хансезаров Р.Ю, Шмарцев Ю.В.// Письма ЖТФ, 5, 930(1979).
36. Зуев В.А, Саченко А.В., Толпыго К.Б, Неравновесные приповерхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах, 24. «Сов. Радио», М. (1977).
37. Гуткин А.А., Седов В.Е.// ФТП. 1975. Т. 9, В. 9 С. 1761-1765.
38. Kumar V, Dahlke W.E // Sol. St. Electron., 20, 143 (1977).
39. Clarke R.A, Shewchun J // Sol. St. Electron., 14, 957 (1971).

40. Singh R, Shewchun J // Appl. Phys. Lett., 28, 512 (1976).
41. Сб. Свойства структур металл—диэлектрик—полупроводник (под ред. Ржанова А.В.). «Наука», М. (1976).
42. Секен К, Томпсет М, Приборы с переносом заряда. «Мир», М. (1978).
43. Сб. Проблемы физики поверхности полупроводников (под ред. Снитко О.В) «Наукова думка», Киев (1981).
44. Кашерининов П.Г., Кичаев А.В, Харциев В.Е., Кузьмин С.Л., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1993, т.19, вып.9, стр.55-58
45. Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Кузьмин С.Л., Ярошецкий И.Д. // Письма в ЖТФ. 1993, т. 19, №.9, стр. 51-54
46. Кашерининов П.Г, Кичаев А.В, Томасов А.А, Ярошецкий И.Д, // Письма ЖТФ, 20, вып. 18, 16 (1994).
47. Кашерининов П.Г, Кичаев А.В, Ярошецкий И.Д, // ЖТФ, 1995, т 65 вып. 9, стр.193-196.
48. Кашерининов П.Г., Кичаев А.В., Томасов А.А. // ФТП. 1995. Т. 29. В. 11. С. 2092-2107.
49. Kasherininov P.G, Kichaev A.V // Proc. of SPIE, Vol. 2779, p. 266-268, 1996.
50. Кашерининов П.Г, Матюхин Д.Г // Письма ЖТФ, 1995, т. 21, вып. 18, с. 56-60.
51. Кашерининов П.Г., Матюхин Д.Г. // ФТП, 1998, том 32 №6 стр. 28-31.
52. Kasherininov P.G., Kichaev F.V., Lodygin A.N., Sokolov V.K., //Proc. of SPIE. V. 5381. 2004.P. 292-301.
53. Kasherininov P.G., Lodygin A.N., Sokolov V.K.,// Proc. of SPIE. 2003. V. 5066. P. 273-280.
54. Кашерининов П.Г, Кичаев А.В, Корольков В.И, Лодыгин А.Н, Солдатенков Ф.Ю, // Письма в ЖТФ т.32, в 9, 2006г.
55. Kasherininov P.G, Kichaev A.V, Lodygin A.N, Tomasov A.A, Sokolov V.K, // Proc of SPIE Vol.6251, 625112
56. Kasherininov P.G, .Lodygin A.N, Sokolov V.K “Semiconductor nanostructures for creation number of new types light controlled high speed operation optoelectronic devices” 12th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, 2004, p.184-186.
57. Kasherininov P.G., Kichaev A.V., Tomasov A.A., Sokolov V.K.// Proc. of SPIE. 2007. V. 6594. P. 65941 G.
58. Кашерининов П.Г, Томасов А.А, // Письма в ЖТФ, т.34, вып 8, стр. 68-76, 2008г
59. Кашерининов П.Г, Томасов А.А, // ФТП, т.42, вып.11, стр.1391-1399, 2008г.
60. Dahlke W.E.,Sze S.M.// Solid State Electronics, 1967,v.10, N 8, P. 865-873.
61. Green M.A. and Shewchun J.// Solid State Electronics, 1974,v.17, N 4, P. 349-365.
62. Гуткин А.А., Седов В.Е.//ФТП 1976, Т.10,В 8, С1589-1591.

63. Cavalleri G, Gatti E, Fabri G, Svelto V, // Nucl. Instrum. Meth., 92, 137 (1971).
64. Вуль А.Я, Саченко А.В.// ФТП. 1983. Т. 17, В. 8. С. 1361-1376.
65. Мустель Е.Р. Парыгин В.Н., Методы модуляции и сканирования света. М.: Паука.-1970. 295 с.
66. Аркадьева Е.Н, Маслова Л.В, Матвеев О.А, Прокофьев С.В, Рывкин С.М, Хусаинов А.Х, // ЛАН СССР, 221, вып. 1, 77 (1975).
67. Agrinskaya N.V, Arkadeva E.N, // Phys. St. Sol. (b), 143, КЮЗ (1987).
68. Hage-Ali M, R. Stuck R, Scharager C, Siffert P, // IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-26, 281, (1979).
69. Кашерининов П.Г, Кичаев А.В, Перепелицын Ю.Н, Харциев В.Е, Ярощещкий И.Д, Фотоэлектрические явления в полупроводниковых структурах с фоточувствительным распределением электрического поля и оптоэлектронные приборы на их основе. Часть 2 С.Петербург: Препринт ФТИ 1570 1991 г.-62 с.
70. Кичаев А.В. "Исследование перестройки электрического поля в высокоомных полупроводниковых структурах." Диссертация на соискания ученой степени кандидата физико математических наук. Специальность 01.04 10. С. Петербург ФТИ РАН 1995г.
71. Milnes A.G, Deep Impurities in Semiconductors (N.Y-London,j.Wiley & Sons, 1963).
72. Кашерининов П.Г, Томасов А.А, Берегулин Е.В "Быстрые оптические регистрирующие среды на полупроводниковых наноструктурах для записи изображений на зарядах свободных фотоносителей" ФТП, 2011, том 45, выпуск 1, с 3-22