



003450562

На правах рукописи

КОВАЛЕНКО Андрей Викторович

**ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ  
ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ**

Специальность 05.13.05 - «Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:

3 0 ОКТ 2008

Москва – 2008 г.

Работа выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники  
Московского инженерно-физического института  
(Государственного Университета).

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник, доцент Подлепецкий Борис Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор МГТУ им. Н.Э.Баумана  
Школьников Владимир Михайлович,

кандидат физико- математических наук, начальник лаборатории  
ФГУП НИИП Талеро Константин Иванович

Ведущая организация: Институт стратегической стабильности Госкорпора-  
ции Росатом. или Институт прикладной химической физики в составе РНЦ  
“Курчатовский институт”

Защита состоится 24 ноября 2008 г. в час. на заседании диссертационно-  
го совета Д.212.130.02 при Московском Инженерно-физическом Институте  
(Государственном Университете) по адресу:115409, Москва, Каширское  
шоссе, д.31.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Московского  
Инженерно-физического Института (Государственного Университета).  
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31.

Автореферат разослан «24» октября 2008 г.

Отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенный подписью и печатью  
организации) просим отправлять по адресу: Ученый совет МИФИ (ГУ)  
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.212.130.02  
д.т.н., профессор



Скоробогатов П.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность.** В состав современных систем управления входят измерительные каналы, элементами которых являются датчики физических величин. Характерной тенденцией совершенствования систем управления является применение в них электронных блоков на основе интегральных микросхем, в том числе интегральных датчиков (ИД), содержащих несколько электронных элементов. В системах управления климатическим и экологическим состояниями окружающей среды производственных и бытовых зон, в системах обеспечения взрыво- и пожаробезопасности объектов используются датчики концентраций различных газов. Одной из проблем в области разработки газоаналитических средств измерения и контроля является проблема создания малогабаритных приборов и систем для определения концентраций газов в реальном масштабе времени. Для решения этой проблемы перспективным представляется разработка приборов и систем с микроэлектронными датчиками (электронными датчиками на основе микро- и нанотехнологий). Миниатюрность, механическая прочность, прецизионность, надёжность и низкая стоимость являются отличительными особенностями микроэлектронных датчиков (МЭД).

Весьма актуальной является задача создания средств контроля концентраций водорода и водородсодержащих газов в среде, поскольку даже при малых концентрациях водорода может возникнуть взрывоопасная и пожароопасная ситуация на электростанциях и в шахтах, в производственных зонах предприятий по созданию ядерного топлива, аккумуляторных хранилищах и в реактивных двигателях на водородном топливе. Исследования различных типов водородочувствительных элементов МЭД показали, что по своим метрологическим характеристикам перспективными представляются чувствительные элементы (ЧЭ) на основе МДП-структур, особенно элементы на основе МДП-транзистора с палладиевым затвором. Важным качеством такого транзистора является его технологическая совместимость

с элементами интегральных микросхем. Кроме газочувствительных ЧЭ, на основе полевых структур электрод-диэлектрик-полупроводник (как многофункционального структурного элемента) созданы чувствительные элементы дозы ионизирующего излучения, концентраций атомов и ионов в растворах, а также ЧЭ биосенсоров, передаточные характеристики которых имеют общие закономерности, но детально мало изучены.

На кафедре микро- и нанoeлектроники МИФИ разработаны интегральные датчики концентрации водорода, основными чувствительными элементами в которых являются резисторы, МДП-конденсаторы или МДП-транзисторы с различными затворами. Предварительные исследования этих ЧЭ показали, что наибольшую чувствительность к водороду имеют МДП-транзисторы со структурой  $\text{Pd-Ta}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2\text{-Si}$  (ТЧЭ). ТЧЭ является основным элементом интегральных датчиков серии ИДВ-3. Основы физики работы и конструктивно-технологические особенности ТЧЭ подробно исследовались сотрудниками кафедры в 1995-2000-х годах.

Эксплуатационные и метрологические характеристики при долговременной эксплуатации датчиков, а также влияние на характеристики ТЧЭ внешних факторов и электрических режимов работы к моменту начала работы над диссертацией были не изучены. Первые опыты практического применения датчиков ИДВ-3 в мобильных приборах выявили ряд недостатков. Это, во-первых, повышенная потребляемая мощность (что сокращает время их работы при одной зарядке источника питания и требует аттестации приборов на взрывобезопасность), во-вторых, при определённых условиях измерений наблюдается большая погрешность, которая изменяется во времени (что требует периодической калибровки приборов). Было сделано предположение, что такая погрешность объясняется временной и температурной нестабильностью параметров датчика и схем вторичного преобразования. Для проверки этого предположения необходимо было исследовать стабильность характеристик датчиков при долговременной их эксплуата-

ции. Важно также было провести количественные оценки вклада в погрешность различных влияющих факторов с учетом их динамических составляющих. Не было исследовано влияние водорода, температуры, электрических режимов на характеристики других элементов ИДВ-3, которые могут привести к дополнительным погрешностям. Отсутствие физико-математических моделей ТЧЭ и схем для описания их характеристик, а также недостаточность экспериментальных данных не позволяли оценить предельные возможности ТЧЭ как элемента интегральных датчиков газоаналитических приборов и микросистем. Кроме того, научный и практический интерес представляют исследования селективности ТЧЭ по отношению к другим газам и влияние внешних побочных факторов на характеристики всех элементов ИД. Схемотехнические вопросы проектирования вторичных преобразователей ИД на основе ТЧЭ с учетом их реальных характеристик подробно не изучались. Поэтому исследования метрологических и эксплуатационных характеристик интегральных датчиков водорода с МДП-транзисторными чувствительными элементами и влияния на них схем включения и режимов работы ТЧЭ представляются актуальными.

**Целью** данной диссертации является улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик и оценка предельных возможностей интегральных датчиков водорода с МДПТЧЭ при рациональном выборе измерительных схем и электрических режимов работы элементов датчика на основе моделирования их характеристик.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1). Анализ состояния разработок и характеристик элементов датчиков концентраций водородосодержащих газов, а также возможных конструктивно-технологических и схемотехнических решений для создания газочувствительных ИД и микросистем.

- 2). Экспериментальное исследование метрологических и эксплуатационных характеристик ТЧЭ с учетом действия на них влияющих факторов и определение основных составляющих погрешностей измерений.
- 3). Разработка физико-математических моделей (формул для расчёта характеристик ТЧЭ и датчиков на их основе), определение параметров этих моделей.
- 4). Исследование влияния измерительных схем и электрических режимов включения ТЧЭ на характеристики интегральных датчиков на их основе.
- 5). Разработка методик оптимального выбора схем включения и электрических режимов элементов интегральных датчиков на основе ТЧЭ и оценка предельных возможностей улучшения характеристик интегральных датчиков за счёт применения этих методик.
- 6). Формулировка предложений по разработкам новых типов интегральных датчиков на основе МДП-транзисторных чувствительных элементов и рекомендаций по их применению в газоаналитических приборах и микросистемах.

**Научная новизна** диссертации заключается в разработке математических моделей для описания характеристик интегральных датчиков на основе ТЧЭ с учётом влияющих факторов и применение их при выборе схем и электрических режимов включения элементов датчика водорода для повышения чувствительности, расширения диапазона преобразования, линеаризации функции преобразования, снижения порога чувствительности и погрешности измерений в заданном диапазоне концентраций газа, а также для оценки предельных параметров ИД . При этом получены следующие **научные результаты**:

– проанализированы состояние разработок интегральных датчиков концентраций водородосодержащих газов, характеристики их элементов, пути и проблемы создания газочувствительных ИД и микроприборов, показана перспективность применения МДП-транзисторных чувствительных эле-

ментов в базовых ячейках интегральных датчиков на основе многокристалльных сборок;

– экспериментально исследованы временной дрейф порогового напряжения, метрологические и эксплуатационные характеристики МДП-транзисторных чувствительных элементов при долговременных испытаниях датчиков;

– в результате экспериментальных исследований метрологических и эксплуатационных характеристик ТЧЭ определены основные причины, количественные значения составляющих погрешностей измерений концентрации водорода (разброс параметров отклика, временной дрейф порогового напряжения ТЧЭ, изменения температуры кристалла, напряжение на затворе, действие внешних побочных факторов, погрешности измерительных преобразователей и устройств обработки данных);

– определена зависимость чувствительности и быстродействия ТЧЭ от температуры кристалла и электрических режимов их включения, что можно использовать для оптимизации значений рабочих режимов и температур; установлено, что оптимальный интервал рабочих температур (с точки зрения минимального влияния колебаний температуры кристалла) составляет  $(120\div 140)^\circ\text{C}$ , а максимальная чувствительность к водороду проявляется при температуре кристалла  $(175\div 180)^\circ\text{C}$  и при значениях начального напряжения на затворе, лежащих в пределах от 0,3В до 0,5 В.

– экспериментально показано, что водород при концентрациях до 4% не влияет на характеристики других элементов интегрального датчика ИДВ-3, что избавляет разработчиков от защиты этих элементов от действия на них газа;

– на основе аппроксимации экспериментальных зависимостей разработана физико-математическая модель откликов водородочувствительных МДП-транзисторных чувствительных элементов, которую после определения параметров модели можно использовать как математическое обеспечение

имитаторов датчиков при разработке и отладке измерительных приборов и микросистем;

– получены формулы для расчёта основных характеристик возможных вариантов схем включения ТЧЭ в измерительные цепи, на основе которых показано, как порог чувствительности и чувствительность, потребляемая мощность и диапазон преобразования схем зависят от типа и конфигурации схемы, количества чувствительных элементов, начальных значений порогового напряжения и напряжения на затворе ТЧЭ, напряжения питания и сопротивлений резисторов;

– дана оценка возможностям оптимального выбора схем и электрических режимов их работы по заданным критериям и исходным характеристикам чувствительных элементов на основе МДПТ.

**Практическая значимость** диссертации заключается в следующем:

– результаты исследования характеристик ТЧЭ, схем и электрических режимов их работы использованы при разработках мобильных измерительных приборов и детекторов малых концентраций водорода и аммиака (порядка  $10^{-4}$  об. %), которые были испытаны в условиях физического эксперимента для оценки концентрации водорода в вакууме, контроля концентрации водорода при перезарядке аккумуляторных батарей и измерения концентрации аммиака в выдыхаемом воздухе в области медицинских диагностик;

– разработанные аппаратно-программные средства для экспериментальных исследований характеристик интегральных датчиков на основе ТЧЭ, позволяющие получать протоколы исследований сразу после окончания эксперимента, могут быть также использованы для испытаний других типов чувствительных элементов датчиков концентрации газов;

– полученные в результате экспериментального исследования характеристик ТЧЭ значения параметров физико-математической модели откликов водородочувствительных МДП-транзисторных чувствительных элементов использованы в имитаторах датчиков для отладки измерительных систем;



– разработанные методики выбора схем включения и электрических режимов элементов интегральных датчиков на основе ТЧЭ, а также результаты оценки предельных возможностей улучшения характеристик датчиков могут использоваться при разработках новых типов интегральных датчиков концентраций водородсодержащих газов, а также датчиков других физических величин на основе МДП-транзисторов.

**На защиту выносятся** следующие положения:

- 1) результаты экспериментальных исследований параметров отклика ТЧЭ и составляющих погрешности их определения;
- 2) классификация и физико-математическая модель откликов ТЧЭ как основы математического обеспечения расчётов динамических характеристик схем ИД с ТЧЭ, а также имитаторов датчиков, используемых при разработке и отладке измерительных приборов и микросистем;
- 3) результаты экспериментального исследования метрологических и эксплуатационных характеристик ТЧЭ при их долговременной эксплуатации с учетом действия на них влияющих факторов и количественные значения параметров отклика и основных составляющих погрешностей измерений;
- 4) результаты исследования влияния на метрологические и эксплуатационные характеристики ИД с ТЧЭ измерительных схем и электрических режимов их работы;
- 5) оценка возможностей выбора схем включения ТЧЭ и их электрических параметров для улучшения определённых характеристик интегральных датчиков (чувствительности, диапазона преобразования, линейности функции преобразования, порога чувствительности и погрешности измерений) в заданном диапазоне концентраций газа;
- 6) рекомендации по практическому применению интегральных датчиков на основе ТЧЭ в приборах и микросистемах, предложения по их дальнейшим разработкам.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации обсуждались на симпозиуме «Symposium on Measurements and Control in Robotics» (1998, г. Прага, Чехия), научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» – «ДАТЧИК-2000» (Крым, Украина) и на ежегодных конференциях «Научная сессия МИФИ» (98, 99, 2000 и 2008).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 78 наименований и приложений на 27 страницах. Работа изложена на 187 страницах, содержит 98 рисунков и 9 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проведенный в главе 1 (литературный обзор) анализ публикаций по микроэлектронным газоаналитическим системам управления, их элементной базе, характеристикам газочувствительных интегральных датчиков и возможным путям их создания позволил оценить состояние разработок в этой области и сделать следующие выводы. Устройства вторичного преобразования и обработки данных одноканальных и многоканальных газоаналитических систем для датчиков с амплитудным и частотным выходами могут изготавливаться в виде ИМС. Элементная база газочувствительных МЭД разнообразна, но для создания ИД наиболее приемлемыми являются ЧЭ резисторного типа и ЧЭ на основе МДП структур, которые имеют хорошую совместимость с элементами ИМС. При создании газочувствительных интегральных датчиков важным этапом является выбор элементов его базовой ячейки (БЯ) – (минимального набора необходимых элементов для создания ИД): основного ЧЭ, нагревательного элемента (НЭ) и термочувствительного элемента (ТЭ). Поскольку в газочувствительных датчиках рабочая температура ЧЭ высокая, устройства вторичного преобразования и сбора данных (аналоговые

коммутаторы, усилители, АЦП и др.) конструктивно-технологически интегрировать с элементами БЯ нецелесообразно. Поэтому при создании ИД и микросистем предпочтение следует отдавать многокристальным конструкциям, в которых функционально первым является базовый кристалл (БК) – чип (безкорпусная ИМС), содержащий элементы БЯ в законченном конструктивно-технологическом виде. При этом функциональная структура измерительного канала соответствует последовательной цепочке преобразователей. По конструктивно-технологическим и метрологическим характеристикам наиболее перспективными для кремниевого ИД водорода представляются следующие элементы БЯ: основной ЧЭ – МДПТ (ТЧЭ), НЭ на основе диффузионного резистора и ТЭ на основе (p–n)- перехода.

Во второй главе рассмотрены физические принципы работы МДП – транзисторных чувствительных элементов, метрологические, эксплуатационные и конструктивно-технологические характеристики водородочувствительных ТЧЭ разных серий ИДВ. Отмечается, что полевые транзисторы со структурой электрод-диэлектрик-полупроводник могут быть ЧЭ датчиков различных типов величин: температуры, дозы ионизирующего излучения, концентрации ионов в электролитах, концентрации газов. Принцип работы ЧЭ на основе полевых транзисторов заключается в изменении распределения зарядов в структуре электрод (затвор)-диэлектрик-полупроводник под действием внешних факторов (температуры, световых и ионизирующих излучений, концентраций ионов электролитов и молекул окружающих газов), а также рабочих электрических полей. Несмотря на различные конструктивно-технологические характеристики МДП-транзисторных ЧЭ при входном информативном параметре  $X$  и параметрах влияющих факторов  $z_j$  выходным информативным параметром для всех ЧЭ является порогового напряжения  $U_0$ . Как правило, изменение порогового напряжения  $|\Delta U_0| = F(X; z_j)$  – нелинейная монотонно возрастающая функция от  $X$ , стремящаяся

при больших значениях  $X$  к максимального значения модуля изменения порогового напряжения  $|\Delta U_M(z_j)|$ , которое зависит от конструктивно-технологических характеристик ЧЭ, влияющих факторов и напряжения между затвором и подложкой  $U_{зп}$ . В диссертации анализируются факторы, входящие в известные модели порогового напряжения МДПТ, для датчиков физических и химических величин. Показано, что для газочувствительных МДПТЧЭ при постоянной температуре  $\Delta U_0$  можно представить как

$$\Delta U_0(N; z_j) = \Delta \varphi_{мп}(N) - [\Delta Q_N(N; z_j) + \Delta Q_0(z_j) + \Delta Q_{пс}(\varphi_n)]/C_0, \quad (1)$$

где  $\Delta \varphi_{мп}$  – изменение потенциала, соответствующего разности работ выхода материалов затвора и полупроводника от концентрации газа  $N$ ;  $C_0$  – удельная ёмкость подзатворного диэлектрика;  $\Delta Q_N(N; z_j)$  – изменение заряда под действием газа концентрации  $N$  с учётом влияющих факторов  $z_j$ ;  $Q_0(z_j)$  – изменение заряда в диэлектрике под действием влияющих факторов;

$$Q_{пс}(\varphi_n) = \alpha_c \cdot q \cdot N_{пс} \cdot (\varphi_{п0} - \varphi_n) \quad (2)$$

– предполагается, что заряд поверхностных состояний с эффективной плотностью ( $\alpha_c \cdot N_{пс}$ ) изменяется линейно при изменении поверхностного потенциала  $\varphi_n$ ,  $\varphi_{п0}$  – модуль разности между потенциалом середины запрещённой зоны полупроводника и потенциалом уровня Ферми в глубине полупроводника.. Экспериментальные зависимости порогового напряжения ТЧЭ от концентрации водорода  $\Delta U_0(N) < 0$  и аппроксимировались как  $|\Delta U_0(N; z_j)| = |\Delta U_M(z_j)| \cdot (1 - \exp(-kN))$ , где параметры модели принимали значения  $\Delta U_M = (0,30 \dots 0,55)$ В и  $k = (14 \dots 23)$  (1%).

Выражения (1) и (2) предложены впервые и использовались далее при оценке вклада различных факторов в погрешность измерения концентрации водорода. При сравнении расчётов выходных ВАХ ТЧЭ по упрощённой и по уточнённым моделям МДПТ установлено, что по изменениям тока стока  $\Delta I_C$  (при  $\Delta U_{зп} = 0,5$ В) результаты отличаются не более, чем на 9%, что соответствует для  $\Delta U_0$  погрешности  $< 4,5\%$ . Учитывая, что у лучших ТЧЭ из

серии ИДВ-3 погрешность для оценки  $\Delta U_0$ , связанная с разбросом характеристик, превышает 5%, при моделировании характеристик схем (в 4-ой главе диссертации) использовалась упрощённая модель МДПТ.

Даны уточнённые определения и обозначения основных метрологических и эксплуатационных характеристик ТЧЭ, исследуемых в диссертации: импульсная переходная характеристика (отклик) –  $\Delta U_0 = F(\Delta N; t)$ ; функция преобразования (передаточная характеристика) –  $\Delta U_{0M} = f(N)$ ; чувствительность (крутизна функции преобразования): дифференциальная  $S_{до} = dU_{0M}/dN$ , интегральная  $S_0 = \Delta U_{0M}/\Delta N$ ; порог чувствительности  $N_{по}$ ; диапазон измеряемых концентраций; погрешности измерения и оценки параметров характеристик; селективность; потребляемая мощность; время подготовки.

Проведённый во второй главе анализ литературных данных по исследованиям характеристик газочувствительных МДПТЧЭ показал как метрологические и эксплуатационные характеристики датчиков зависят от конструктивно-технологических характеристик ЧЭ. В частности, установлено, что тип, способ получения и толщина затворной металлической пленки влияют на селективность и чувствительность МДПТЧЭ, а тип и толщины подзатворного диэлектрика влияют ещё на быстрдействие датчика.

Приведены основные характеристики МДПТЧЭ всех серий интегральных датчиков, разработанных на кафедре. Топологические особенности, геометрические и электрофизические характеристики элементов ИДВ-3 использовались как исходные данные при моделировании интегральных датчиков на основе ТЧЭ.

**В третьей главе** рассмотрены методы, средства и результаты экспериментальных исследований метрологических и эксплуатационных характеристик ТЧЭ, разработаны физико-математические модели характеристик ТЧЭ и определены их параметры. Приведены результаты экспериментального исследования влияния временного дрейфа порогового напряжения, температуры кристалла, электрического режима работы ТЧЭ и внешних

факторов на погрешность определения амплитуды отклика. Исследованы стабильность и воспроизводимость характеристик ИДВ-3 при их долговременной эксплуатации. Установлены зависимости параметров отклика датчика от конструктивно-технологических характеристик ТЧЭ, концентрации газа, температуры кристалла, состава газовой среды, внешних побочных факторов, схемы включения и электрического режима работы ТЧЭ. Параметры физико-математической модели откликов представлены на рис. 1.

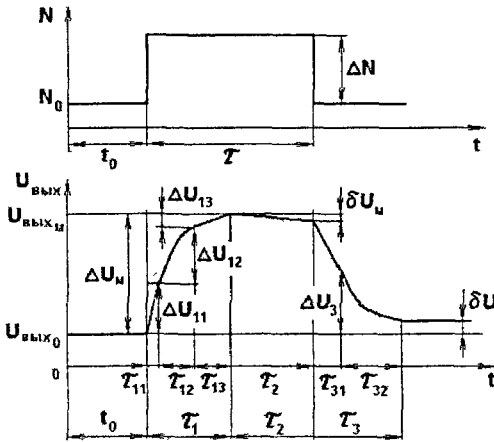


Рис. 1. Обобщённый вид откликов схем датчиков водорода на основе ТЧЭ и характерные их параметры. Временные параметры отклика:  $t$  – время;  $\tau$  – время действия импульса концентрации;  $t_0$  – время начала действия импульса концентрации газа;  $\tau_1$  – время фронта нарастания ( $\tau_1 = \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{13}$ );  $\tau_{11}$  – время 1-ой фазы фронта нарастания,  $\tau_{12}$  – время 2-ой фазы фронта нарастания,  $\tau_{13}$  – время 3-ей фазы фронта нарастания;  $\tau_2$  – длительность «полки»;  $\tau_3$  – время релаксации ( $\tau_3 = \tau_{31} + \tau_{32}$ ),  $\tau_{31}$  – время 1-ой фазы релаксации,  $\tau_{32}$  – время 2-ой фазы релаксации.  $N$  – концентрация газа.  $\Delta N$  – изменения концентрации газа. Амплитудные параметры отклика: 1)  $\Delta U_M = |U_{\text{вых}M} - U_{\text{вых}0}|$  – амплитуда отклика, максимальное изменение выходного напряжения схемы датчика  $U_{\text{вых}}$  вследствие изменения концентрации водорода на  $\Delta N$ , где  $U_{\text{вых}0}$  и  $U_{\text{вых}M}$  – начальное и максимальное значения выходного напряжения датчика;  $\Delta U_M = \Delta U_{11} + \Delta U_{12} + \Delta U_{13}$ , где  $\Delta U_{11}$ ,  $\Delta U_{12}$ ,  $\Delta U_{13}$  – амплитудные составляющие фаз фронта нарастания отклика; 2)  $\delta U_M$  – изменение (уменьшение) амплитуды отклика; 3)  $\Delta U_3$  – составляющая линейной фазы спада отклика; 4) остаточное напряжение  $\delta U = [U_{\text{вых}}(t_0 + \tau + \tau_3) - U_{\text{вых}0}]$  – один из параметров воспроизводимости отклика.

1. Первая фаза фронта нарастания амплитуды отклика («линейная») при  $t \in [t_0; t_0 + \tau_{11}]$ :  $\Delta U_{\text{вых1}} = (\Delta U_{11} / \tau_{11}) \cdot (t - t_0)$ ,  $t$  – время от начала включения датчика,  $\Delta U_{11}$  и  $\tau_{11}$  – экспериментально определяемые параметры отклика (см.рис.1). Поскольку вид отклика зависит от концентрации водорода, предлагаем экспериментально установленные критерии трех уровней концентраций: 1) малые (до 0,05%), если  $\Delta U_{11} = 0$ ; 2) средние (0,05 – 0,2%), если  $0 < \Delta U_{11} < 0,5\Delta U_M$ ; 3) большие ( $> 0,2\%$ ), если  $\Delta U_{11} > 0,5\Delta U_M$ . Первая фаза проявляется при средних и больших концентрациях водорода и высоких температурах кристалла. Предполагается, что она связана с процессами абсорбции молекул водорода в палладии, их диссоциации на атомы, захват центрами и изменением величины работы выхода из палладия. При малых концентрациях эта фаза не проявляется и можно считать  $\tau_{11} = 0$  и  $\Delta U_{11} = 0$ .

2. Вторая фаза фронта нарастания амплитуды отклика («нелинейная») при  $t \in (t_0 + \tau_{11}; t_0 + \tau_{11} + \tau_{12}]$ :  $\Delta U_{\text{вых2}} = \Delta U_{11} + (\Delta U_M - \Delta U_{11}) \cdot \{1 - \exp[-(t - t_0 - \tau_{11}) / \tau_{10}]\}$ , где  $\tau_{10} = \tau_{11} * \left(\frac{\Delta U_M}{\Delta U_{11}} - 1\right)$ . Предполагается, что вторая фаза фронта нарастания связана с диффузией атомов водорода в палладии к поверхности диэлектрика и образованием диполей на границе Pd – диэлектрик (поляризация границы диэлектрика на границе металл - диэлектрик).

3. Третья фаза фронта нарастания («линейная медленная») при  $t \in (t_0 + \tau_{11} + \tau_{12} + \tau_{13})$ :  $\Delta U_{\text{вых3}} = \Delta U_{11} + \Delta U_{12} + \frac{\Delta U_{12}}{\tau_{12}} (t - t_0 - \tau_{11} - \tau_{12})$ ,

где  $\Delta U_{12} = (\Delta U_M - \Delta U_{11}) * (1 - e^{-\tau_{12} / \tau_{10}})$ ,  $\frac{\Delta U_{12}}{\tau_{12}} = \frac{\Delta U_M - \Delta U_{11}}{\tau_{10}} e^{-\tau_{12} / \tau_{10}}$ ,

$$\Delta U_{\text{вых3}} = \Delta U_{11} + \Delta U_{12} + \frac{\Delta U_{12}}{\tau_{11}} * e^{-\frac{\tau_{12}}{\tau_{11}(k_1-1)}} * (t - t_0 - \tau_{11} - \tau_{12}), \quad k_1 = \frac{\Delta U_M}{\Delta U_{11}}$$

Предполагается, что третья фаза может быть связана с процессами диффузии и дрейфом протонов внутри диэлектрика в сторону полупроводника,

временным дрейфом порогового напряжения  $U_{00t}$ , а также химическими реакциями на границе металла с газовой средой. В ТЧЭ эта фаза может проявляться при малых концентрациях  $H_2$ . Полное время нарастания переднего фронта  $\tau_1 \approx \tau_{11} + 3\tau_{10}$ .

$$4. \text{Четвертая фаза («полка») при } t \in (t_0 + \tau_1; t_0 + \tau]: \Delta U_{\text{вых}4} = \Delta U_M - \frac{\delta U_M}{\tau_2} * (t - t_0 - t_1),$$

или  $\Delta U_{\text{вых}4} = \Delta U_{\text{вых}3}(t_0 + \tau_1) + \Delta U_{00}(t) + \Delta U_{0N}(t)$ , где  $\delta U_M$  при больших концентрациях  $H_2$ , как правило, равен нулю, а при малых и средних концентрациях определяется временным дрейфом порогового напряжения  $\Delta U_{00}(t)$  и параметром  $\Delta U_{0N}(t)$ , связанным с конвекционными изменениями концентрации газа  $N(t)$  в испытательной камере. Например, при  $\Delta U_{0N}(t) = 0$  параметр  $\delta U_M = \Delta U_{00}(t_0 + \tau_1) - \Delta U_{00}(t_0 + \tau)$ .

5. Пятая фаза – «линейный» спад амплитуды отклика при  $t \in (t_0 + \tau; t_0 + t + \tau_{31}]$ :

$$\Delta U_{\text{вых}5} = \Delta U_{\text{вых}4}^* - \frac{U_{\text{вых}4}^* - \Delta U_3}{\tau_{31}} * (t - t_0 - \tau), \quad \Delta U_{\text{вых}4}^* = \Delta U_{\text{вых}4}(t = t_0 + \tau), \quad \Delta U_{\text{вых}4}^* \approx \Delta U_M - \delta U_M.$$

Пятая фаза проявляется при средних и больших концентрациях  $H_2$  в кислородной среде. При этом с ростом концентрации кислорода величина  $\left(\frac{U_{\text{вых}4}^* - \Delta U_3}{\tau_{31}}\right)$  увеличивается. В безкислородной среде и при малых концентрациях  $H_2$  эта фаза отсутствует ( $\Delta U_3 = \Delta U_M - \delta U_M$ ;  $\tau_{31} = 0$ ).

6. Шестая фаза – «нелинейный» спад амплитуды отклика при

$$t \in (t_0 + \tau + \tau_{31}; t_0 + \tau_3]: \Delta U_{\text{вых}6} = \Delta U_3 - (\Delta U_3 - \delta U) * \left[1 - \exp\left(-\frac{t - \tau - t_{31}}{\tau_{10}}\right)\right].$$

Эта фаза наблюдается при всех уровнях концентрации водорода в кислородной среде. При этом с увеличением концентрации кислорода в среде параметр  $\delta U$  уменьшается. При наличии временного дрейфа начального значения порогового напряжения  $U_{00}(t)$  в течение времени  $t_{др}$  и отсутствии 3-ей фазы  $\delta U = \Delta U_{00}(t)$ , а при  $t > t_{др}$   $\delta U = 0$ . Замечено, что для ТЧЭ при больших концентрациях водорода и наличии 3-ей фазы величина остаточного напряжения  $\delta U$  больше, чем в ТЧЭ, в которых 3-я фаза не наблюда-



лась. Возможно, что в этом случае протоны остаются в диэлектрике или на границе  $Ta_2O_5-SiO_2$ , и обратная диффузия протонов к металлу затруднена из-за положительного электрического поля  $U_3 > 0$ . Это предположение обусловлено тем, что при уменьшении  $U_3 \approx$  до нуля (в схеме №1) время  $\tau_3$  уменьшается (протоны быстрее возвращаются к затвору).

Поскольку  $\Delta U_{\text{вых}} = S \cdot \Delta U_0$ , то в случае зависимости чувствительности схемы  $S$  от порогового напряжения  $S = f(\Delta U_0)$ , вид отклика датчика и его параметры отличаются от отклика самого ТЧЭ. При исследованиях ТЧЭ для максимального приближения к физико-химическим процессам, изменяющим зарядовые состояния в структуре МДП желательно, чтобы передаточные характеристики измерительных схем были линейными, т.е. чувствительность схемы  $S$  не зависела бы от  $U_0$ . Если чувствительность схемы  $S=1$ , то  $\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_0$ . Все предварительные исследования ТЧЭ проводились в схеме с чувствительностью  $S=1$ . Установлено, что в области малых концентраций время переднего фронта  $\tau_1$  определяется 2-ой фазой отклика, а задний фронт  $\tau_3$  – 6-ой фазой, а 4-ая фаза («полка») при  $t < t_{\text{др}}$  повторяет дрейф начального значения порогового напряжения  $U_{00}(t)$ . При малых концентрациях водорода (до 0,05 об. %) отклики ТЧЭ можно аппроксимировать следующими выражениями:  $|\Delta U_0| = |\Delta U_{0M}| \cdot (1 - \exp(-t/\tau_{10}))$  (фронт нарастания амплитуды отклика),  $|\Delta U_0| = |\Delta U_{0M}| - |\Delta U_{0M} - \delta U| \cdot (1 - \exp(-t/\tau_{30}))$  – спад амплитуды отклика, где  $\tau_{10}$  и  $\tau_{30}$  – соответствующие постоянные времени переходных процессов. Вид такого отклика представлен на рис. 2.

Статические погрешности измерений определяются погрешностями оценки параметров отклика ТЧЭ  $\Delta U_{0M}$  и  $\delta U$ , которые при средних и больших концентрациях зависят от разброса этих величин, а при малых концентрациях ещё и от погрешности измерения напряжения. Как было установлено экспериментально, величины  $\Delta U_{0M}$  и  $\delta U$  зависят от концентрации водорода и от следующих влияющих факторов: состава атмосферы,

действия внешних электромагнитных полей и излучений, температурных и электрических режимов ТЧЭ.

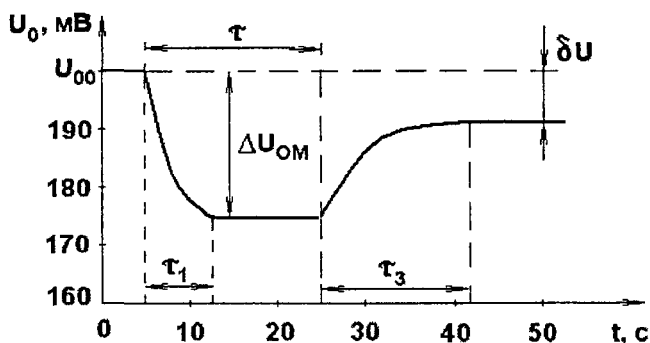


Рис.2. Типичный характер зависимости от времени порогового напряжения ТЧЭ при ступенчатых изменениях малых концентраций водорода.

При кратковременных измерениях откликов параметра  $\Delta U_{0M}$  и  $\delta U$  не всегда достигают установившихся значений, что в основном связано с наличием временных дрейфов начального значения порогового  $\Delta U_{00}(t)$  и концентрации водорода в испытательной камере  $\Delta U_{0N}(t)$ . В общем виде амплитуда отклика может быть представлена как

$$\Delta U_{0M}(N, \{\Delta z_j\}, t) = \Delta U_{0M}(N, \{\Delta z_j\}) + \Delta U_{00}(t) + \Delta U_{0N}(t) \pm \Delta V, \quad (3) \quad \text{где}$$

$\{\Delta z_j\}$  – совокупность изменений параметров влияющих факторов  $z_j$  (температуры чипа, напряжения на затворе ТЧЭ, мощности излучений, концентрации другого газа  $N_j$ ),  $\Delta V$  – абсолютная погрешность измерения напряжения. Поскольку второй и третий члены выражения (3) не зависят от  $N$ , они определяют одну из составляющих аддитивной погрешности при измерениях параметров отклика. Если изменения порогового напряжения  $\Delta U_0$  от параметра  $z_j$  не зависят от  $N$ , то влияние данного параметра также является аддитивной погрешностью и тогда

$$\Delta U_{0M}(N, \{\Delta z_j\}, t) = \Delta U_{0M}(N, \{\Delta z_{j \neq k}\}) + \sum_{k=1}^m \Delta U_{0k}(\Delta z_k(t)) + \Delta U_{00}(t) + \Delta U_{0N}(t), \quad (4)$$

где  $z_k$  – параметры влияющих факторов, дающих аддитивную динамическую составляющую систематической погрешности измерения  $\Delta U_0$ ,  $m$  – количество этих факторов. Такими параметрами являются, например, концентрации других газов (гелия, аммиака, паров бензина). Три последних члена (4) вносят вклад в значение амплитуды отклика, если изменяются параметры  $z_k$ ,  $U_{00}$  и  $U_{0N}$  во время измерения отклика  $t \in (t_0; t_0 + \tau + \tau_3]$ . Если эти параметры во время измерения отклика не изменяются, то амплитуда отклика определяется только первым членом и остаётся постоянной в течение 4-ой фазы отклика («полки»). Однако начальное значение порогового напряжения  $U_{00}$ , от которого может косвенно зависеть амплитуда отклика, определяется конструктивно-технологическими характеристиками ТЧЭ, специальными отжигами и газовыми тренировками, а также параметрами влияющих факторов  $z_j$ .

Временной дрейф начального значения порогового напряжения ТЧЭ является аддитивной составляющей погрешности при измерении их откликов и может вносить существенный вклад в общую погрешность измерения концентрации водорода. Поэтому исследования характера и параметров дрейфа  $U_{00}(t)$  является важной задачей с точки зрения учета связанной с дрейфом погрешностью, оценки возможности её снижения и компенсации при использовании ТЧЭ в приборах и системах. Для проведения таких исследований были разработана специальная методика, включающая пять алгоритмов испытаний: измерения  $U_{00}(t)$  при комнатной температуре; измерения  $U_{00}(t)$  при рабочей температуре кристалла (125-130°C); измерения  $U_{00}(t)$  при рабочей температуре кристалла и кратковременным отключениям нагревателя; многократные измерения  $U_{00}(t)$  при рабочей температуре с периодическим отключением питания, а затем долговременным (на 5-7 дней) отключением всех элементов датчика, потом повторные измерения  $U_{00}(t)$ ; многократные измерения откликов ТЧЭ во время дрейфа  $U_{00}$ . Для анализа результатов выбраны следующие параметры дрейфовых характеристик

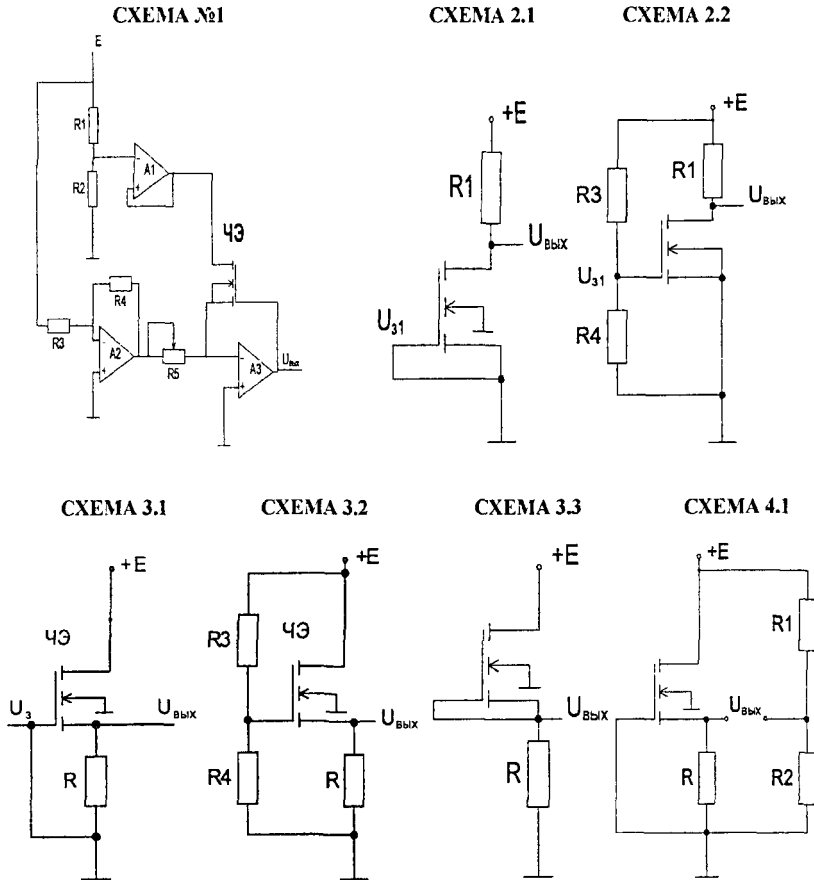
$U_{00}(t)$ :  $U_{00И}$  и  $U_{00У}$  – исходное и установившаяся величина  $U_{00}$ ;  $U_{00М}$  – максимальная величина дрейфа;  $v_{др}$  – скорость дрейфа;  $t_{др}$  – время дрейфа. Измерения дрейфовых характеристик  $U_{00}(t)$  проводились до полного установления  $U_{00}$  через 20-30 мин после включения измерительного стенда.

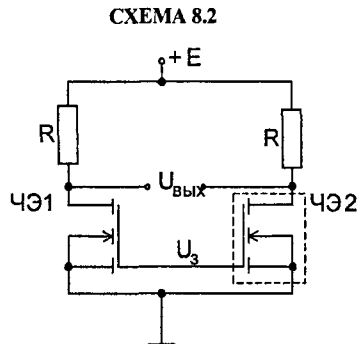
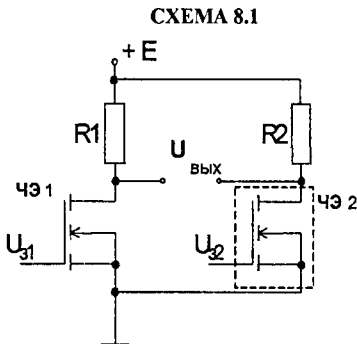
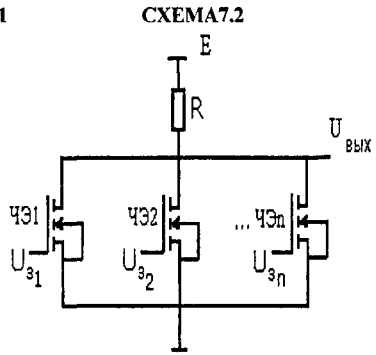
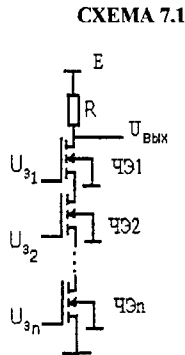
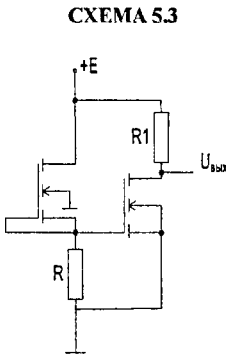
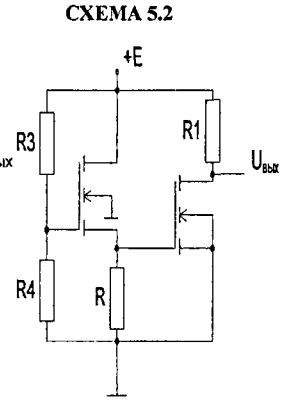
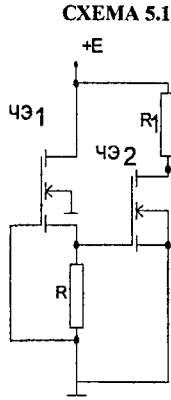
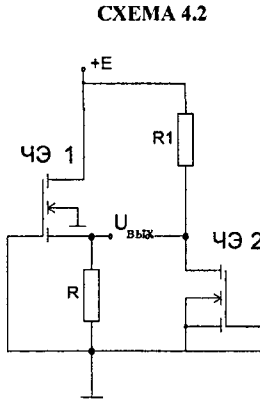
Получено, что пороговое напряжение в отсутствие водорода изменяется во времени, при этом время переходного процесса  $t_{др} \approx (5-20)$  минут), максимальные величины временного дрейфа ( $U_{00М}$ ) находятся в пределах  $(5 \div 70)$  мВ и зависят от начальных значений  $U_{30}$  и порогового напряжения  $U_{00И}$ , а максимальная скорость временного дрейфа наблюдается сразу после включения ТЧЭ и находится в пределах  $(1 \div 40)$  мВ/мин. Наилучшие дрейфовые характеристики имели образцы с малыми отрицательными значениями  $U_{00И}$ :  $U_{00М} < 5$  мВ и  $t_{др} < 6$  мин.

Экспериментально исследованы характеристики ТЧЭ и влияние на них температуры кристалла, электрического режима работы, световых излучений и других газов, а также влияние водорода на другие элементы ИДВ-3. Проведены долговременные испытания ТЧЭ. На основании полученных данных определены параметры моделей ТЧЭ. В частности, установлено: порог чувствительности  $N_{по} = (0,0005 \dots 0,001)$  об %; диапазон измеряемых концентраций  $\Delta N \in [N_{по}; N_{макс} \sim (1,5 \dots 3) \text{ об. \%}]$ ; быстродействие:  $\tau_{1ср} \leq (0,20 \dots 0,5)$  мин и  $\tau_{3ср} \leq (0,3 \dots 1,2)$  мин; температурная чувствительность  $S_T = (1 \dots 5)$  мВ/град; чувствительность к свету:  $S_p = 63$  мВ/Вт (При  $T=130^\circ\text{C}$ ); чувствительность к аммиаку:  $S_N = 150$  мВ/%; для лучших ТЧЭ (группа А) разбросы амплитуд отклика и относительного значения остаточного напряжения  $\theta_{л} \leq (0,05 \dots 0,1)$ , максимальная величина дрейфа  $\Delta U_{00М} = - (4-10)$  мВ, время дрейфа  $t_{др} = (5-7)$  мин. и длительность непрерывной работы  $(110 \dots 120)$  дней.

В четвёртой главе приводятся результаты анализа характеристик типовых схем включения ТЧЭ в измерительные цепи. Для измерения измене-

ния порогового напряжения можно использовать различные схемы, включая МДП-транзистор как трёхполюсник или двухполюсник. При этом для измерения  $\Delta U_0$  используются разные методы, среди которых наибольшее распространение получили два: 1) в режиме поддержания постоянных значений тока стока  $I_C$  и напряжения сток-исток  $U_{СИ}$ ; 2) в режиме поддержания постоянного напряжения на затворе  $U_3$ . В данной работе предлагается и исследован дополнительно третий метод: режим изменяющегося напряжения  $U_3$  в зависимости от  $\Delta U_0$ . Для реализации этих методов рассмотрены базовые схемные конфигурации, представленные на рис.2.





Исследованы следующие характеристики представленных выше схем:  
 передаточная характеристика  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_0)$ , интегральная  $S = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_0$  и

дифференциальная  $S_d = dU_{\text{вых}}/dU_0$  чувствительности, потребляемая мощность  $P$  и диапазон преобразования  $\Delta U_{\text{оп}}$  схем, где  $\Delta U_{\text{вых}}$  и  $\Delta U_0$ .

Получены формулы для расчёта основных характеристик схем. Схемы предполагают включение  $n$ -канального ТЧЭ в следующих режимах: 1) как трехполюсника в режиме постоянного тока стока (схема №1,  $U_{\text{вых}} = U_3$ ); 2) в режимах постоянного напряжения на затворе ( $U_{\text{вых}} = U_C$  в схемах №2 и  $U_{\text{вых}} = U_H$  в схемах №3.1 и 3.2); 3) мостовые схемы с одним и двумя ЧЭ (схемы №4); 4) последовательное и параллельное включений нескольких ЧЭ (схемы №7) и 5) каскадное (схемы №4) и дифференциальное включение двух ЧЭ (схемы №8). Рассмотрены также схемные конфигурации с элементарными ЧЭ (в диссертации – схемы №6) и варианты схем, в которых ТЧЭ работают в режиме изменяющегося напряжения  $U_3$  в зависимости от  $\Delta U_0$ : схема 3.3, схемы № 5.1 и 5.2 (в ЧЭ2) и схема №5.3 (в обоих ЧЭ). Исследованные схемы по количеству ТЧЭ можно классифицировать следующим образом: 1) с одним ТЧЭ («простые»); 2) с двумя ТЧЭ; 3) с несколькими ТЧЭ ( $n \geq 3$ ). По состоянию напряжения между затвором и подложкой (фактически состояние параметра  $U_3$ ) можно выделить три режима работы ТЧЭ в схемах: 1) фиксированное значение  $U_3 = \text{const}$ ; 2)  $U_3$  изменяется и равно выходному напряжению схемы  $U_{\text{вых}}$ ; 3)  $U_3$  изменяется в зависимости от изменения порогового напряжения  $\Delta U_0$  либо данного ТЧЭ (при обратной связи  $U_3 = U_{\text{вых}}$ ), либо при подключении затвора ТЧЭ к выходу другого ТЧЭ, напряжение которого зависит от  $\Delta U_0$ , т.е. когда  $U_3 = f(\Delta U_0)$ .

На основе сравнительного анализа характеристик схем показано, как чувствительность, потребляемая мощность и диапазон преобразования схем зависят от типа и конфигурации схемы, количества чувствительных элементов, начальных значений порогового напряжения и напряжения на затворе ТЧЭ, напряжения питания и сопротивлений резисторов. Это даёт возможность при заданных исходных характеристиках ТЧЭ сделать оптимальный выбор схем и электрических режимов их работы. Уникальной особенностью

чувствительных элементов на основе МДПТ является управляемость их характеристиками напряжением между затвором и подложкой  $U_{зп}$ , что помимо оптимального выбора начального значения  $U_{зп}$  позволяет повышать чувствительность датчиков за счёт применения «самоуправляемых» схемных конфигураций с внутренним усилением.

В пятой главе представлены методики оптимального выбора по заданным критериям схем включения и электрических режимов работы МДПТ-транзисторных чувствительных элементов для проектирования на их основе датчиков и микросистем. Общие характеристики исследованных схем и рекомендации по их применению представлены в таблице.

Общие характеристики схем

Схемы	Достоинства	Недостатки	Рекомендации по применению
1	минимальная погрешность из-за $Q_{nc}$ и $U_{оот}$ , большой диапазон преобразования $\Delta U_{оп}$	сложность настройки, трудность реализации в БК ИД	испытания ТЧЭ, применение для снижения погрешности $U_{оот}$ и $Q_{nc}$
2, 3.1, 3.2	простота, повышенная чувствительность, возможность оптимального выбора режима	ограниченный диапазон преобразования	как схемы БК ИД с оптимизацией параметров по заданным критериям
3.3	высокая дифференциальная чувствительность	ограниченный $\Delta U_{оп}$ , высокая нелинейность	для малых $\Delta U_{оп}$ с последующим усилением
4	повышенная чувствительность	большая $P$ , ограниченный $\Delta U_{оп}$	для малых $\Delta U_{оп}$ с последующим усилением
5	очень высокая чувствительность	повышенная $P$ , огранич. $\Delta U_{оп}$	как схемы БК ИД с оптимизацией параметров по заданным критериям
7.1	небольшая $P$ , возможность повышения $\Delta U_{оп}$	низкая чувствительность и надёжность	для расширения $\Delta U_{оп}$ за счёт $E$
7.2	высокие чувствительность и надёжность	повышенная $P$	в качестве элемента ИД, когда мощность не критична
8	повышенная помехозащищённость, возможность оптимального выбора режима	ограниченный диапазон преобразования	при больших уровнях помех и влияния побочных факторов

Для схемы №1 характерным являются большой диапазон преобразования, минимальное влияние на погрешность заряда поверхностных состояний, минимизация погрешности временного дрейфа за счёт рационального выбора режима (тока стока  $I_C$  и напряжения сток-исток  $U_{СИ}$ ), соответствующего установившемуся значению начального порогового напряжения. Пока-



заны возможности повышения чувствительности, линейности функции преобразования, снижения порога чувствительности и погрешности измерений в заданном диапазоне концентраций газа для схем №№ 2–8 за счет рационального выбора их электрических режимов, определяемых параметрами  $\{U_3\}$ ,  $E$  и  $\{R_i\}$ . Получены формулы для оценки предельных возможностей улучшения характеристик ИД на основе ТЧЭ. Например, для повышения чувствительности ИД в заданном диапазоне преобразования  $\Delta U_M$  при оптимальном значении  $U_3 = U_3^* = \{[1 + 2\alpha E]^{0.5} - 1\} / \alpha - \Delta U_M$  максимальное значение чувствительности не превышает  $S_M \approx (E/\Delta U_M - 1)$ , где  $E$  – напряжение питания и  $\alpha \approx bR_i$ . Минимальный порог чувствительности ограничивается величиной  $N_{p, \min} = \{2E \cdot \Delta U_M / (k \cdot (E - \Delta U_M)^2)\} \cdot \ln[\Delta U_M / (\Delta U_M - \Delta V)]$ , а снижение погрешности влияющих факторов в схеме №8  $\Delta < 0,5\alpha \cdot (\Delta U_{0Z})^2$ .

Даны рекомендации по практическому применению ТЧЭ в водородочувствительных датчиках и системах управления газового состава сред, которые сводятся к общим процедурам предварительных испытаний и сортировке ТЧЭ по группам для использования в приборах и системах различного назначения. Дана оценка возможных режимов эксплуатации ТЧЭ и критических параметров систем (быстродействие, погрешность, время подготовки) для следующих областей применения: экологический мониторинг, перезарядка аккумуляторов, детекторы утечек газов, оценка степени пожара в шахтах, извещатели об опасных ситуациях, пробный экологический контроль и медицинская диагностика. Предложены пути разработок интегральных газочувствительных датчиков на основе МДП-транзисторных чувствительных элементов. Один из них – разработка газочувствительных ИД на основе БК, содержащих помимо НЭ и ТЭ четное количество нескольких одинаковых ТЧЭ и резисторов на тонкой мембране кристалла, с дифференциальной парой параллельно соединённых ТЧЭ по схеме №8.

**В заключение** обсуждаются основные результаты диссертации.

## ВЫВОДЫ

Основные научные и практические результаты диссертации заключаются в следующем.

1. При создании газочувствительных ИД важным этапом является выбор элементов его базовой ячейки (БЯ) – (минимального набора необходимых элементов, интегрируемых в ИД): основного ЧЭ, нагревательного элемента (НЭ) и термочувствительного элемента (ТЭ). Из-за принципиально высокой рабочей температуры ЧЭ газочувствительных датчиков устройства вторичного преобразования и сбора данных интегрировать на одном кристалле с элементами БЯ нецелесообразно. Поэтому при создании ИД и микросистем предпочтение следует отдавать многокристальным конструкциям, в которых функционально первым является базовый кристалл (БК) – чип (безкорпусная ИМС), содержащий в законченном конструктивно-технологическом виде элементы БЯ и малочувствительные к температуре элементы.

2. При рассмотрении полевых транзисторов со структурами электрод(затвор)-диэлектрик-полупроводник как многофункциональных ЧЭ датчиков (температуры, световых и ионизирующих излучений, концентраций ионов электролитов и молекул окружающих газов) выявлены их общие особенности – выходным информативным параметром для всех ЧЭ является изменение порогового напряжения  $\Delta U_0$ , нелинейно зависящее от входного информативного параметре  $X$ , стремясь к максимальному значению  $\Delta U_M$ , которое зависит от электрического режима ЧЭ. Предложены формулы для моделирования характеристик водородочувствительных ТЧЭ при постоянной его рабочей температуре, учитывающие влияющие факторы и изменения заряда поверхностных состояний.

3. На основе аппроксимации экспериментальных зависимостей разработаны физико-математические модели откликов ТЧЭ для разных концентраций водорода с учётом основных составляющих погрешностей и опре-

делены её параметры, что явилось научной основой исследования характеристик ИД с ТЧЭ, а также математическим обеспечением имитаторов датчиков для отладки измерительных приборов и систем.

4. В результате исследований характеристик ТЧЭ определены основные причины, модели и количественные значения составляющих погрешностей измерений концентрации водорода (временной дрейф порогового напряжения ТЧЭ, изменения температуры кристалла, действие излучений и других газов, разброс параметров отклика, изменение напряжения на затворе, погрешности средств оценки электрического напряжения, концентрации водорода и времени).

5. Зависимости чувствительности ТЧЭ от температуры кристалла и электрических режимов их включения использовались для оптимизации значений рабочих режимов и температур – оптимальный интервал рабочих температур (с точки зрения минимального влияния колебаний температуры кристалла) составляет  $(120\div 140)^\circ\text{C}$ , а максимальная чувствительность к водороду проявляется при температуре кристалла  $(175\div 180)^\circ\text{C}$  и при значениях начального напряжения на затворе, лежащих в пределах от 0,3В до 0,5 В. Экспериментально показано, что водород при концентрациях до 4% не влияет на характеристики других элементов интегрального датчика ИДВ-3, что избавляет разработчиков от защиты этих элементов от действия на них газа.

6. Получены формулы для расчёта основных характеристик схем включения ТЧЭ в измерительные цепи, на основе которых показано, как функция преобразования, порог чувствительности и чувствительность, потребляемая мощность и диапазон преобразования схем, переходная характеристика и систематическая погрешность измерения концентрации водорода. зависят от типа и конфигурации схемы, количества чувствительных элементов, начальных значений порогового напряжения и напряжения на затворе ТЧЭ, напряжения питания и сопротивлений резисторов.

7. Рассмотрены возможности оптимального выбора схем и электрических режимов их работы по заданным критериям и исходным характеристикам ИД на основе ТЧЭ. Сформулированы предложения по созданию интегральных датчиков на основе МДП-транзисторных чувствительных элементов и рекомендации по их применению в приборах и системах.

Результаты исследования характеристик ТЧЭ, схем и электрических режимов их работы использованы при разработках мобильных измерительных приборов и детекторов малых концентраций водорода и аммиака (порядка  $10^{-4}$  об. %), которые были испытаны в условиях физического эксперимента для оценки концентрации водорода в вакууме, контроля концентрации водорода при перезарядке аккумуляторных батарей и измерения концентрации аммиака в выдыхаемом воздухе в области медицинских диагностик.

**Основные положения и результаты диссертации представлены в работах:**

1. Ледовский К.В., Подлепецкий Б.И., Гуменюк С.В., Коваленко А.В. Исследование характеристик кремниевых датчиков водорода. // Сборник научных трудов, часть 5. Научная сессия МИФИ-98, М., МИФИ, 1998, 257-258.
2. Подлепецкий Б.И., Гуменюк С.В., Ледовский К.В., Коваленко А.В. Исследование характеристик кремниевых датчиков водорода. // Приборы и системы управления, № 9, 1998, 71-73.
3. B. Podlepetsky , S. Gumenjuk, K. Ledovsky, A. Kovalenko INTEGRATED HYDROGEN GASES MICROSENSORS // Proceedings of VIII Int. Symposium on Measurements and Control in Robotics, 1998, Praque, Czech Republic, 17.

4. Подлепецкий Б.И., Никифорова М.Ю., Измайлов Д., Степаньяни Н., Гуменюк С.В., Коваленко А.В. Исследование стабильности характеристик интегральных сенсоров водорода и влияния на них светового излучения. // Сборник научных трудов, том 6, Научная сессия МИФИ-99, М., МИФИ, 1999, 91-92.
5. Никифорова М.Ю., Подлепецкий Б.И., Гуменюк С.В., Коваленко С.В. – Исследование эксплуатационных характеристик интегральных сенсоров водорода. // Труды конференции «Датчик-2000», Крым, 2000. с 67.
6. Никифорова М.Ю., Подлепецкий Б.И., Гуменюк С.В., Коваленко А.В., Макарова И.Ю., Мамедов Г.С., Чиликин А.А. Исследование воспроизводимости характеристик интегральных сенсоров водорода при их долговременной эксплуатации. // Сборник научных трудов, том 1, Научная сессия МИФИ-2000, М., МИФИ, 2000, 147-148.
7. Подлепецкий Б.И., Никифорова М.Ю., Гуменюк С.В., Коваленко А.В. Исследования стабильности характеристик интегральных сенсоров водорода и влияния на них светового излучения. // Датчики и системы. 2001. №6. С. 29-31.9.
8. Коваленко А.В., Никифорова М.Ю., Подлепецкий Б.И. Влияние электрических режимов работы МДП-транзисторного сенсорного элемента на характеристики интегрального датчика водорода // Научная сессия МИФИ -2008: Тез. докл.– М., 2008.–Т. 8. – С. 123-124.
9. Никифорова М.Ю., Подлепецкий Б.И., Коваленко А.В., Бабамуратов А.А., Полунин А.В. Исследование рабочих характеристик термосенсорного элемента интегрального датчика водорода // Научная сессия МИФИ -2008: Тез. докл.– М., 2008.–Т. 8. – С. 125-126.
10. Коваленко А.В., Никифорова М.Ю., Подлепецкий Б.И. Характеристики и схемы включения МДП-транзисторных чувствительных элементов. // Датчики и системы. 2008.– №8, С. 10-14.

Подписано в печать 23.10.2008 г.

Печать трафаретная

Заказ № 1037

Тираж 100 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»  
ИНН 7726330900  
115230, Москва, Варшавское ш., 36  
(499) 788-78-56  
[www.autoreferat.ru](http://www.autoreferat.ru)