

На правах рукописи

МАЛЫХ АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ НА
ОСНОВЕ КНИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
ТРАНЗИСТОРНОГО ТИПА**

Специальность 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Мурашев Виктор Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Астахов Владимир Петрович
(главный специалист ОАО «ШВАБЕ –
ФОТОСИСТЕМЫ)

доктор физико-математических наук,
профессор
Масловский Владимир Михайлович
(г.н.с. ФГУП НИИ Физических проблем)

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-
исследовательский институт молекулярной
электроники» (АО «НИИМЭ»)

Защита состоится « » _____ 201__ г. в « » часов «00» мин. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.204.01 при Физико-технологическом институте Российской академии наук по адресу: г. Москва, Нахимовский проспект д. 36 к. 1, 6 этаж, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.204.01,
кандидат физико-математических наук



Вьюрков В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы активно развиваются разработки датчиков и датчиковых систем с радиочастотным беспроводным интерфейсом. Контрольно-измерительные системы с такими приборами могут применяться в медицинской, автомобильной, космической аппаратуре, в аппаратуре ЖКХ, робототехнике и автоматике, устройствах области интернета вещей и т.д. Применение беспроводного взаимодействия датчиков с контрольной аппаратурой позволяет полностью избавиться от части коммутационных проводов, тем самым, улучшив массогабаритные параметры.

Кроме того, активное развитие микроэлектронных технологий и технологий беспроводной передачи данных обуславливает большой интерес к беспроводным сенсорным сетям и измерительным комплексам. Область применения беспроводных сенсорных сетей непрерывно расширяется и охватывает, например, транспорт, промышленность, коммунальное хозяйство, системы охраны и слежения, быт и другое, включая портативные измерительные системы.

В измерительных системах с беспроводным интерфейсом могут применяться датчики с частотным выходом (ДЧВ), то есть датчики, в которых изменение частоты электрического сигнала на выходе пропорционально интенсивности внешнего воздействия. Частотная форма выходного сигнала обеспечивает возможность организации помехозащищенной беспроводной связи с функциональными блоками аппаратуры. Кроме этого метод преобразования воздействия в частоту позволяет повысить рабочую частоту, разрешающую способность датчиков, позволяет упростить преобразование аналогового сигнала в цифровой, поскольку в некоторых случаях дает возможность отказаться от использования блоков усиления и(или) аналого-цифрового преобразования. Устройства, основанные на таком методе преобразования, могут иметь сравнительно малую стоимость и при этом быть высокоточными передатчиками данных.

Для расширения сфер эффективного применения указанных измерительных устройств и систем важно, чтобы они были способны функционировать при экстремальных для микроэлектронных компонентов условиях, в частности, при экстремальных температурах. При этом особенно важной является область высоких температур.

Проблему расширения допустимой рабочей температуры микроэлектронных ДЧВ можно решить, применяя технологию «кремний на изоляторе» (КНИ). Как известно, изоляция чувствительных элементов датчиков от подложки не р-п-переходом, как в схемах на объемном кремнии, а диэлектриком значительно более надежна и позволяет поднять верхний предел рабочих температур кремниевых приборов от 120-150 °С до 300-400 °С. В настоящей работе в качестве основы датчиков с частотным выходом предлагается использование КНИ чувствительного элемента транзисторного типа - полевого датчика Холла (ПДХ), выполненного по КНИ технологии [Л1].

ПДХ выполнен в тонком n^+-p-n^+ слое кремния КНИ структуры и представляет собой двухзатворный МОП транзистор с двумя измерительными контактами на боковых противоположных сторонах канала. Рабочий режим - аккумуляция электронов у границ подзатворных диэлектриков с рабочим слоем кремния, зажатым между ними. Таким образом, ПДХ является гибридом полевого МОП транзистора аккумулятированного типа с двумя затворами и кремниевого чувствительного элемента холловского типа, выходными

характеристиками которого можно управлять с помощью эффекта поля. ПДХ был разработан и изучен в России.

ПДХ имеет ряд важных преимуществ перед традиционными кремниевыми элементами Холла (ЭХ):

- ток потребления КНИ ПДХ в десятки раз меньше, чем у традиционных кремниевых ЭХ, при равном напряжении питания за счет малой толщины рабочего слоя [Л1];
- значительно более высокий предел рабочих температур по сравнению с кремниевыми аналогами [Л2];
- повышенная устойчивость к стационарным радиационным воздействиям, значительно меньшая скорость образования радиационных дефектов, чем в объемных монокристаллах [Л3];
- значительно меньший (до 1000 раз) радиационно-индуцированный ток при импульсных радиационных воздействиях по сравнению с Si ЭХ. Это обусловлено неспособностью радиационно-генерированных в подложке носителей заряда преодолеть диэлектрический барьер захороненного слоя SiO_2 и проникнуть в активную область прибора [Л3];
- наличие двойного полевого управления обеспечивает возможность создания оригинальных датчиковых конструкций на его основе [Л4].

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка физических основ функционирования и конструкций микроэлектронных преобразователей внешних воздействий (магнитного поля, температуры, ионизирующей радиации) с частотным выходом на основе универсальных чувствительных элементов транзисторного типа.

Для достижения целей работы необходимо было решить следующие задачи:

1. Обосновать выбор КНИ полевого датчика Холла в качестве чувствительного элемента датчиков различных внешних воздействий (магнитного поля, температуры, ионизирующей радиации) с частотным выходом.
2. Исследовать основные электрофизические характеристики чувствительного элемента, в том числе в широком диапазоне температур.
3. Определить теоретический предел допустимых рабочих температур КНИ полевого датчика Холла.
4. Разработать, изготовить и исследовать характеристики электрических схем датчиков с частотным выходом, основанных на различных физических механизмах преобразования сигнала чувствительного элемента, индуцированного внешним воздействием, в изменение частоты электрического сигнала датчика.
5. Исследовать возможности использования КНИ транзисторных элементов типа полевого датчика Холла для создания датчиков различных физических воздействий с частотным выходом (на примере магнитного поля, температуры, ионизирующей радиации).
6. Исследовать возможности оптимизации электрических характеристик датчиков с частотным выходом на основе КНИ полевого датчика Холла.
7. Разработать конструкцию универсального мультисенсорного многоканального датчика с частотным выходом на основе КНИ полевого датчика Холла.

Научная новизна работы

1. Теоретически показано, что полевое управление может обеспечить повышение предельной рабочей температуры КНИ транзисторного чувствительного элемента по крайней мере на 400 °С по сравнению с традиционными кремниевыми датчиками Холла и по крайней мере на 200 °С по сравнению с известными из литературы КНИ-транзисторами.

2. Эффект зарядовой связи в КНИ магниточувствительном элементе, обусловленный гальваническим взаимодействием между двумя затворами полевой управляющей системы, сопровождается изменением подвижности носителей заряда в канале и позволяет повысить чувствительность к магнитному полю.

3. Особенности вольт-амперной характеристики полевого датчика Холла на участке лавинного умножения носителей могут быть положены в основу преобразования магнитного воздействия в частотный выходной сигнал.

Практическая полезность

1. Эффект зарядовой связи в КНИ чувствительных элементах транзисторного типа обеспечивает возможность повышения пороговой магнитной чувствительности датчиков с магнитного поля с частотным выходом на его основе.

2. Использование мультивибраторной схемы преобразования внешнего воздействия в частоту на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа обеспечивает существенное расширение диапазона рабочих частот датчиков, их чувствительности и, что принципиально важно, возможности создания многоэлементных конструкций датчиковых систем. Последнее принципиально важно для разработки контрольно-измерительной сенсорной аппаратуры космических летательных аппаратов следующего поколения.

3. Предложена универсальная конструкция КНИ чувствительного элемента, обеспечивающая возможность измерения различных внешних воздействий (магнитного поля, температуры, ионизирующей радиации) на базе единой конструкции чувствительного элемента.

4. Предложена и реализована схема универсального многофункционального сенсорного устройства на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа, способного последовательно осуществлять измерения магнитного поля и температуры.

Автор защищает

1. Физические и конструктивные принципы функционирования микроэлектронных преобразователей внешних воздействий в частотный сигнал на основе универсальных КНИ чувствительных элементов транзисторного типа.

2. Результаты теоретического анализа, показывающие, что предельная рабочая температура КНИ транзисторного чувствительного элемента по крайней мере на 400 °С по сравнению с традиционными кремниевыми датчиками Холла и по крайней мере на 200 °С по сравнению с известными из литературы КНИ-транзисторами.

3. Результаты исследования влияния эффекта зарядовой связи полевой управляющей системы на характеристики КНИ магниточувствительного элемента транзисторного типа.

4. Конструкцию универсального КНИ чувствительного элемента, обеспечивающую возможность измерения различных внешних воздействий (магнитного поля, температуры, ионизирующей радиации) и многофункционального датчика на его основе.

Достоверность научных положений, результатов и выводов

Достоверность научных результатов обусловлена применением общепринятых экспериментальных методов: измерениями вольт-амперных и передаточных характеристик, э.д.с. Холла, а также использованием измерительных приборов с высоким классом точности. Полученные в работе результаты и выводы неоднократно апробированы на международных и российских конференциях, а также согласуются с принятыми теоретическими моделями и экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015, Россия, Омск, 2015.
2. 17th International Conference on Sensors and Measurement Technology SENSOR 2015, ФРГ, Нюрнберг, 2015.
3. Международная конференция EUROSENSORS 2015, ФРГ, Фрайбург, 2015 г.
4. Школа-конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2016", Россия, Санкт-Петербург, 2016.
5. 23-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2016», Россия, Москва, 2016.
6. 2nd International Conference on Sensors and Electronic Instrumental Advances (SEIA' 2016), Испания, Барселона, 2016.
7. Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC– 2016), Россия, Москва, 2016.

Публикации по теме

По теме диссертации опубликованы 12 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, в том числе 4 работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Личный вклад

Личный вклад соискателя заключался в выборе методик проведения исследования, разработке и изготовлении макетов измерительной аппаратуры, планировании, проведении и анализе результатов экспериментов по измерению электрофизических характеристик КНИ чувствительных элементов типа ПДХ, разработке и схемотехнической реализации ДЧВ на основе таких элементов. Автором лично разработано теоретическое представление, позволяющее оценить предельную рабочую температуру КНИ магниточувствительных элементов типа ПДХ, обнаружена возможность использования эффекта зарядовой связи для повышения магниточувствительности КНИ полевого датчика Холла. Также предложены и экспериментально проверены некоторые способы расширения функциональных возможностей многофункциональных ДЧВ на основе мультивибраторной схемы.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и основных выводов работы. В ней 126 страниц, 71 рисунок, 10 таблиц, библиография насчитывает 61 источник.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, перечислены задачи, которые были решены для достижения поставленной цели, сформулированы положения научной новизны, практической полезности и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору. В ней приводятся основные данные об используемом в работе КНИ чувствительном элементе транзисторного типа – так называемом полевом датчике Холла (ПДХ), обосновывается выбор такого чувствительного элемента. Обсуждаются особенности построения датчиков по принципу преобразования внешних воздействий в изменение частоты электрического сигнала на выходе – датчиков с частотным выходом (ДЧВ), рассматриваются их достоинства перед схемами датчиков с традиционным выходом по току или напряжению. Кроме того, в главе приведены основные методы создания ДЧВ.

Вторая глава посвящена объектам исследования. К ним относятся КНИ полевой датчик Холла и схемы датчиков с частотным выходом на его основе.

ПДХ представляет собой двухзатворный кремниевый МОП транзистор с полевой управляющей системой типа металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл (МДПДМ), встроенным каналом и измерительными контактами на боковых противоположных сторонах рабочего слоя Si для регистрации э.д.с. Холла. В главе описаны характеристики КНИ структуры, использованной при изготовлении ПДХ. Основной функциональный режим ПДХ – режим аккумуляции электронов в Si пленке у границ разделов Si-SiO₂. На рисунке 1 схематически показана конструкция ПДХ с пояснением режима работы.

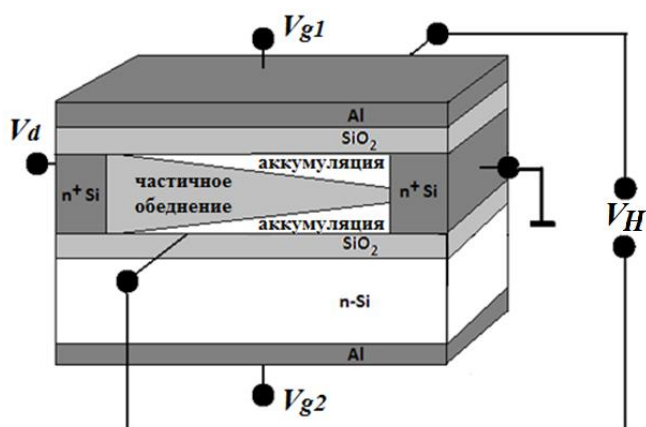


Рисунок 1 – Схематическая конструкция ПДХ. V_d – напряжение питания ПДХ; V_{g1} , V_{g2} – потенциалы верхнего и нижнего затворов ПДХ, соответственно; V_H – напряжения Холла на измерительных холловских контактах

В работе исследуются три типа конструкций ДЧВ с использованием ПДХ, основанные на различных физических механизмах преобразования индуцированного внешним воздействием сигнала в изменение рабочей частоты ДЧВ.

Первая схема представляет собой автогенератор, основанный на появлении скачков тока в канале ПДХ в области лавинного размножения носителей тока. За основу принята схема генератора с КНИ транзистором, приведенная в [Л5].

Вторая схема основана на включении ПДХ цепь автогенераторного устройства, образованного операционным усилителем, емкостью C и резистором R_2 . ПДХ вместе с емкостями C_1 и C_2 в данном случае представляют собой дополнительную обратную связь, обеспечивающую отклик частоты выходного электрического сигнала автогенератора на внешнее воздействие, приложенное к ПДХ. При этом емкость C задает основную частоту генерации электрического сигнала на выходе. Ранее такая схема была предложена в работе [Л6], однако подробно не исследовалась.

Третий тип конструкции ДЧВ основан на схеме бистабильного мультивибратора, формируемого транзисторами Т1-Т4. Рабочая частота такого мультивибратора изменяется цепью управления частотой, представленной полевыми транзисторами Т5, Т6 и КНИ ПДХ, определяющим разность режимов работы транзисторов Т5 и Т6 за счет эффекта Холла. Схема предложена в [Л7], однако ключевым отличием используемой схемы от описанной в [Л7] является автономное питание КНИ ЧЭ. Это позволяет в широких пределах управлять рабочей частотой мультивибратора с помощью выбора электрического режима питания КНИ ЧЭ.

В работе применялись стандартные для микроэлектроники методы измерения характеристик транзисторов, дополненные измерениями сигнала, индуцированного внешними воздействиями, а также методы измерения характеристик датчиков с частотным выходом.

В **третьей главе** приведены результаты исследования эффекта зарядовой связи в КНИ чувствительном элементе типа ПДХ, а также изучаются основные электрические характеристики, приводятся результаты анализа предельных рабочих температур.

На рисунке 2 приведены экспериментальные результаты влияния эффекта зарядовой связи (charge coupling effect) на характеристики КНИ МДПДМ магниточувствительного элемента. Видно, что использование схемы включения, при которой потенциала V_g подается на оба затвора увеличивает значение напряжения Холла V_H до двух раз, что может быть вызвано частичным смещением профиля распределения электронов аккумулярованных токопроводящих слоев вглубь Si пленки ПДХ и повышению подвижности электронов в них. Повышение тока I более чем в два раза при включении двух затворов (рисунок 2а) также об этом свидетельствует. При этом для всех исследованных вариаций V_d и V_g отношение токов при использовании двух затворов и использовании одного из затворов в два раза выше соответствующего отношения напряжений Холла. Из рисунка 2б также видно, что зависимость, соответствующая включению двух затворов, имеет максимум и последующий спад V_H , который очевидно связан с уменьшением подвижности в увеличивающемся поперечном поле.

Таким образом, повышение индуцируемого напряжения Холла, а, следовательно, и абсолютной чувствительности, обуславливает преимущественное использование в работе конфигурации включения затворов ПДХ, при которой на оба затвора подаются равные потенциалы V_g .

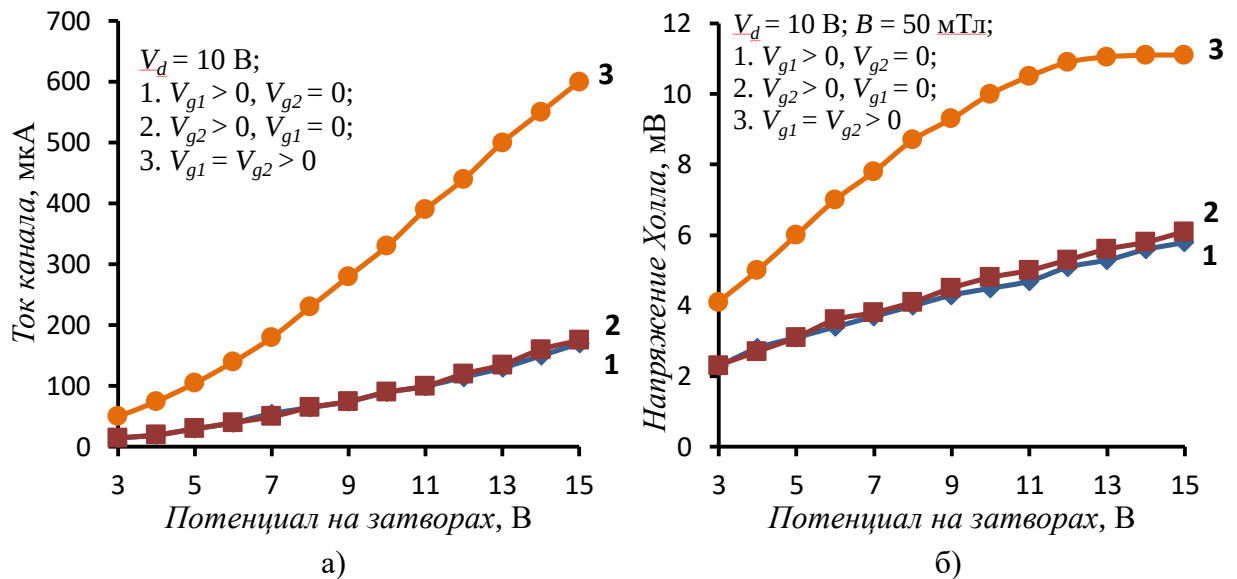


Рисунок 2 – Зависимости тока канала от потенциала затворов (а) и напряжение Холла (б) при различных схемах их включения. Индукция магнитного поля $B=50$ мТл

КНИ ПДХ, являясь двухзатворным аккумулярованным МОП транзистором, имеет вольт-амперные характеристики, свойственные для МОП транзисторов. Зависимости, характеризующие способность ПДХ регистрировать воздействие магнитного поля приведены на рисунке 3. Видно, что полевая система из двух затворов позволяет помимо тока канала управлять напряжением Холла, индуцируемым воздействием магнитного поля. Максимальное значение магниточувствительности ПДХ в измеренных режимах достигает 0.7 мВ/мТл.

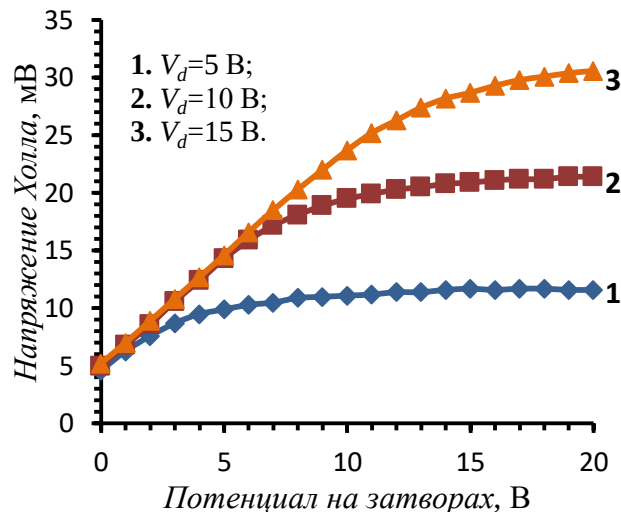


Рисунок 3 – Зависимость напряжения Холла V_H от потенциала на затворах ПДХ при индукции магнитного поля, равном 50 мТл

На рисунке 4 представлены зависимости напряжения Холла от индукции магнитного поля и температурные зависимости рабочего тока ПДХ в традиционном для кремниевых приборов температурном диапазоне. Видно, что все зависимости имеют линейный характер в исследованном диапазоне. Таким образом, КНИ чувствительный элемент типа ПДХ

может осуществлять регистрацию не только магнитного поля, но и других внешних воздействий, способных любым образом влиять на поведение потока электронов в аккумулированных слоях ПДХ. В данной работе это продемонстрировано на примере использования ПДХ в качестве чувствительного элемента датчиков магнитного поля, температуры и ионизирующей радиации с частотным выходом.

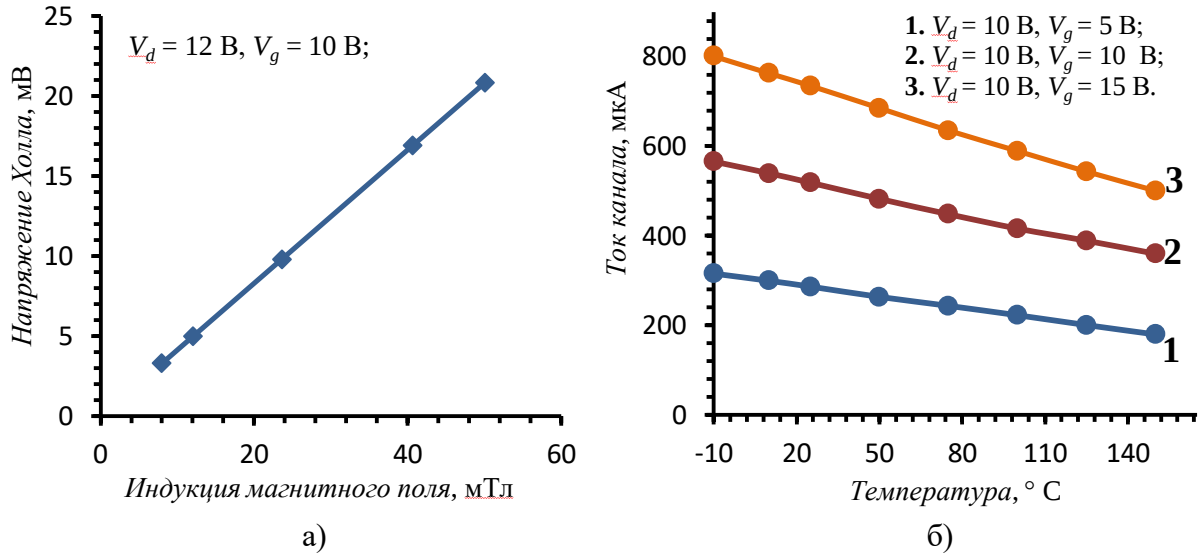


Рисунок 4 – Характерные для ПДХ зависимости (а) напряжения Холла от индукции магнитного поля и (б) рабочего тока ПДХ от температуры в диапазоне $-10 \div 150$ $^{\circ}C$

В этой же главе приведено физическое моделирование предельной рабочей температуры КНИ ПДХ.

Экспериментальные данные показывают, что ПДХ способен функционировать при температурах порядка 330 $^{\circ}C$, однако этот предел не ограничен электрофизическими свойствами ПДХ.

Как было ранее сказано, ПДХ изготовлен на КНИ структуре и представляет собой интеграцию традиционного элемента Холла и двухзатворного полевого МОП транзистора. Известно, что КНИ транзисторы генетически имеют рабочую температуру выше, чем у традиционных кремниевых элементов Холла. Это достигается за счет того, что рабочий слой кремния отделен от подложки скрытым слоем захороненного диэлектрика (SiO_2), который препятствует проникновению в подложку носителей заряда в активную область прибора [Л1]. Поэтому, в отличие от традиционных кремниевых элементов Холла, возрастание тока утечки с ростом температуры не является ограничивающим предельную рабочую температуру фактором.

Рабочим режимом ПДХ является режим частичного обеднения в объеме пленки Si и аккумуляции носителей заряда на границах Si-SiO₂ (рисунок 1). В аккумулированных областях средняя концентрация электронов n_{acc} значительно превышает концентрацию в частично обедненной области и температурная зависимость э.д.с. Холла определяется подвижностью электронов в аккумулированных областях и может быть скомпенсирована с использованием специальных схем компенсации, либо с помощью математической обработки. При повышении температуры выше определенного уровня собственная проводимость центральной области начинает вносить существенный вклад в общий ток,

что очевидно приведет к изменению характера температурной зависимости э.д.с. Холла и невозможности применение упомянутых способов компенсации. Таким образом, задача оценки температурной стойкости ПДХ сводится к оценке влияния температуры на отношение проводимости частично обедненной области σ_{dep} к проводимости аккумулированных областей σ_{acc} .

Проводимость каждой из аккумулированных областей можно определить следующим выражением:

$$\sigma_{acc} = qn_{acc}\mu_n,$$

где q – элементарный заряд, n_{acc} – средняя концентрация электронов в аккумулированном слое, μ_n – подвижность электронов.

Проводимость области обеднения при высоких температурах (при которых $n_i > Nd$, где n_i – собственная концентрация носителей тока в Si), можно определить выражением:

$$\sigma_{dep} = qn_i(\mu_n + \mu_p),$$

где μ_n – подвижность электронов, μ_p – подвижность дырок.

Учитывая факт того, что экспоненциальная зависимость концентрации от температуры

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp(-E_g/2kT)$$

оказывает более сильное влияние на проводимость, нежели степенная зависимость подвижности

$$\mu = 1 / \left(\frac{1}{a} T^{-3/2} + \frac{1}{b} T^{3/2} \right),$$

где коэффициенты a и b определяются типом проводимости, то справедливым можно считать соотношение

$$\frac{\sigma_{dep}(T)}{\sigma_{acc}} \approx \frac{n_i(T)}{n_{acc}}.$$

Критерием, по которому оценивается предельная рабочая температура ПДХ, выбрано следующее соотношение

$$n_i(T) \leq 0.01 n_{acc}, \quad (1)$$

которое при пренебрежении толщинами аккумулированных электронами областей и области между ними, соответствует

$$I_{dep} \leq 0.01 * I_{acc} \quad (2)$$

и обеспечивает выполнение условия протекания тока преимущественно по аккумулированным областям кремниевой пленки.

Распределения электронов для вычисления n_{acc} в сечении пленки Si, зажатой между слоями SiO₂, необходимые для анализа предельных рабочих температур ПДХ, получены путем решения уравнения Пуассона для Si пленки ПДХ, находящегося в статическом режиме для различных концентраций электронов в пленке Si, потенциалов на затворах, толщин пленки Si, а также толщин подзатворных слоев SiO₂. Ниже перечислены основные принятые допущения:

- фиксированные заряды в диэлектриках и заряды поверхностных состояний на границах раздела диэлектрик-полупроводник отсутствуют;
- электрические утечки через слой SiO₂ отсутствуют;
- атомы легирующих примесей полностью ионизованы;
- толщины диэлектриков SiO₂ равны;
- потенциалы на затворах равны;

- толщина кремниевой подложки равна нулю (нижний затвор нанесен непосредственно на диэлектрик);

- режим работы ПДХ соответствует линейному участку ВАХ, то есть $V_d \leq V_g$.

Пленка Si КНИ структуры разделяется на слои и в каждом из них решается уравнение Пуассона, при этом используются следующие граничные условия:

- непрерывность потенциала;
- непрерывность электрической индукции.

Все распределения получены для температуры 300 К. Характерный вид получаемых распределений электронов по сечению канала показан на рисунке 5. Расчет распределений проводился для значений исходной концентрации электронов n_0 в диапазоне от $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Нижняя граница n_0 соответствует концентрации электронов в экспериментальных образцах.

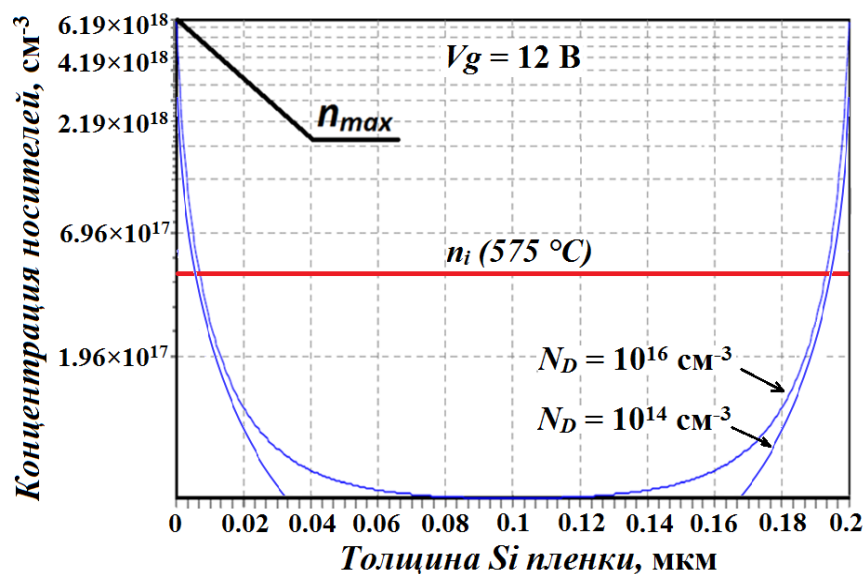


Рисунок 5 – Распределения электронов в сечении пленки Si для разных исходных концентраций электронов, $V_g = 12 \text{ В}$

В таблице 1 приведены аналитические зависимости критерия (1) и температур, при которых достигается соответствующее (1) значение n_i в кремнии, для концентрации N_d , соответствующей экспериментальным образцам, и различным потенциалам на затворах. Видно, что изменение потенциалов, приложенных к затворам ПДХ, позволяет в значительной мере повысить температуру, при которой концентрация термогенерированных носителей в Si-пленки не будет вносить существенный вклад в общий ток. Для наиболее распространенных для магниточувствительных ИС на основе ЭХ режимов работы, т.е. $V_g \leq 12 \text{ В}$, предельную рабочую температуру ПДХ можно оценить примерно в $425 \text{ }^\circ\text{C}$ при $n_0 = 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

В работе также оценивалось влияние толщины пленки кремния, толщин подзатворных диэлектриков и концентрации встроенного в SiO_2 -слои заряда на вклад в предельную рабочую температуру.

Таблица 1 – Значения критерия (1) и предельные рабочие температуры, соответствующие различным исходным концентрациям электронов и потенциалам на затворах ПДХ

Исходная концентрация электронов n_0 , см ⁻³	Потенциал на затворах ПДХ V_g , В	Значение критерия (1), см ⁻³	Предельная рабочая температура, соотв. критерию (1), °С
5×10^{14}	4	2.7×10^{15}	325
	8	1.2×10^{16}	375
	12	2.9×10^{16}	425
	38	2.9×10^{17}	575

В четвертой главе описаны три типа конструкций датчиков магнитного поля с частотным выходом на основе ПДХ:

1. ДЧВ магнитного поля на основе явления скачков тока в канале ПДХ;
2. ДЧВ магнитного поля с использованием ПДХ, включенного в цепь автогенератора;
3. ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ и мультивибраторной схемы.

Характерной особенностью ВАХ исследуемого чувствительного элемента является наличие резкого возрастания (скачка) рабочего тока I при незначительных увеличениях напряжения питания V_d в области лавинного умножения носителей. Появление такого эффекта объясняется возникновением дополнительного потенциала в кремниевом теле чувствительного элемента, вызванного полевым разделением рожденных лавиной электронов и дырок, который при определенных значениях приводит к возникновению паразитного биполярного транзистора вблизи стока, уменьшающего пороговое напряжение (так называемый кинк-эффект).

Крутизна управления частотным выходом ДЧВ на основе явления скачков тока в ПДХ с помощью изменения потенциала на затворах ПДХ различается в зависимости от выбранных значений V_g . Для области $-0.5 \leq V_g \leq 0$ В крутизна управления составляет в среднем 400 Гц/В, в то время как для области $0 \leq V_g \leq 0.5$ В крутизна выше и в среднем составляет около 1.5 кГц/В. Стоит отметить, что характер зависимостей рабочей частоты ДЧВ слабо зависит от напряжения питания схемы.

Для ДЧВ на основе скачков тока в ПДХ характерна нелинейная зависимость абсолютной чувствительности от индукции магнитного поля. При увеличении индукции воздействующего на ПДХ магнитного поля величина абсолютной чувствительности возрастает. Например, при $V_g = -0.5$ В она составляет 12 Гц/мТл при воздействии магнитного поля с индукцией 12 мТл и 43 Гц/мТл при воздействии магнитного поля с индукцией 50 мТл.

Второй тип изучаемого ДЧВ на основе ПДХ – ДЧВ магнитного поля с использованием ПДХ, включенного в цепь автогенератора. Такая схема была выбрана, поскольку в ней используется традиционный подход к усилению холловского сигнала одновременно с участием холловского сигнала в формировании частотного электрического сигнала на выходе. Крутизна управления частотой с помощью изменения потенциала затворов такого ДЧВ составляет 7 кГц/В в диапазоне значений потенциала затворов V_g 6 – 10 В. Зависимости изменения частоты ДЧВ от индукции магнитного поля линейны, при этом чувствительность достигает порядка 25 Гц/В в режиме $V_d = V_{g1} = 8$ В, $V_{g2} = 6$ В.

Третий изучающийся в работе тип датчика магнитного поля с частотным выходом на основе КНИ ЧЭ типа ПДХ – это ДЧВ магнитного поля с использованием мультивибраторной схемы. В работе датчикам с частотным выходом с такой конструкцией уделяется особое внимание, поскольку они имеют лучшие характеристики с практической точки зрения.

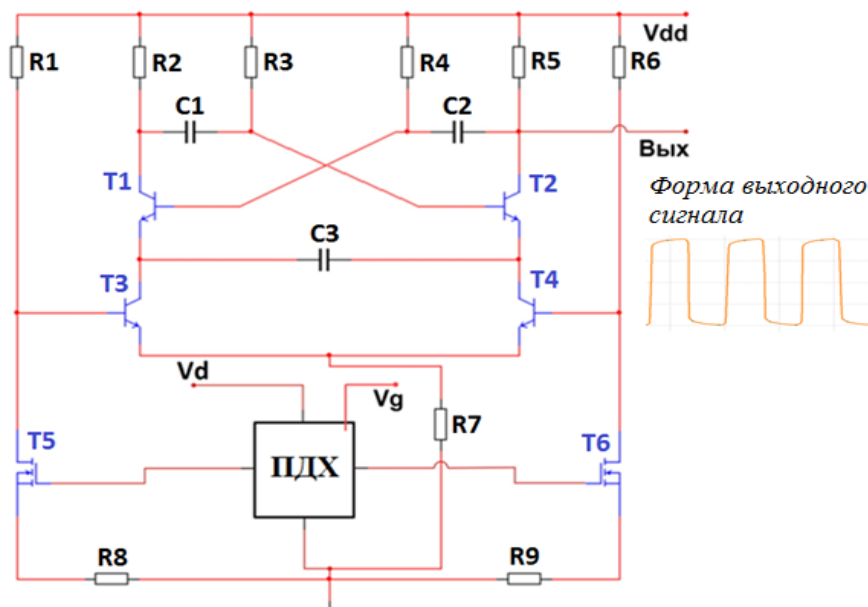


Рисунок 6 – Электрическая схема датчика магнитного поля с частотным выходом на основе мультивибраторной схемы с использованием ПДХ в качестве чувствительного элемента

Как видно из рисунка 7а, зависимости частоты от потенциала на затворах ПДХ практически линейны, при этом крутизна управления частотой достигает порядка 40 кГц/В при значениях напряжения питания 15 В и 20 В. Зависимости преобразования индукции магнитного поля в частоту также являются линейными (рисунок 10б), при этом изменение электрического режима питания ПДХ приводит к изменению наклона зависимости. Максимальная магнитная чувствительность ДЧВ в исследуемых режимах составляла порядка 2.2 кГц/мТл при $V_d = 20$ В и $V_g = 10$ В.

В таблице 2 приведены сравнительные результаты исследования различных конструкций датчиков магнитного поля на основе ПДХ. ДЧВ со схемой бистабильного мультивибратора имеет высокую крутизну управления рабочей частотой ДЧВ с помощью изменения электрических режимов работы ПДХ (по этому показателю превосходит две другие схемы на порядок), а также значительно превосходит схему на основе скачков тока в ПДХ и схему с использованием автогенератора по чувствительности к магнитному полю (превосходит две другие схемы на два порядка).

Важно отметить общую особенность для всех типов изученных конструкций. Она заключается в том, что в них отсутствует необходимость в компенсации остаточного напряжения (т.е. напряжения на холловских контактах в отсутствии магнитного поля), характерного для чувствительных элементов холловского типа [Л8]. Более того, во всех типах зависимость остаточного напряжения Холла от электрических режимов включения ПДХ обеспечивает возможность управления рабочей частотой датчиков.

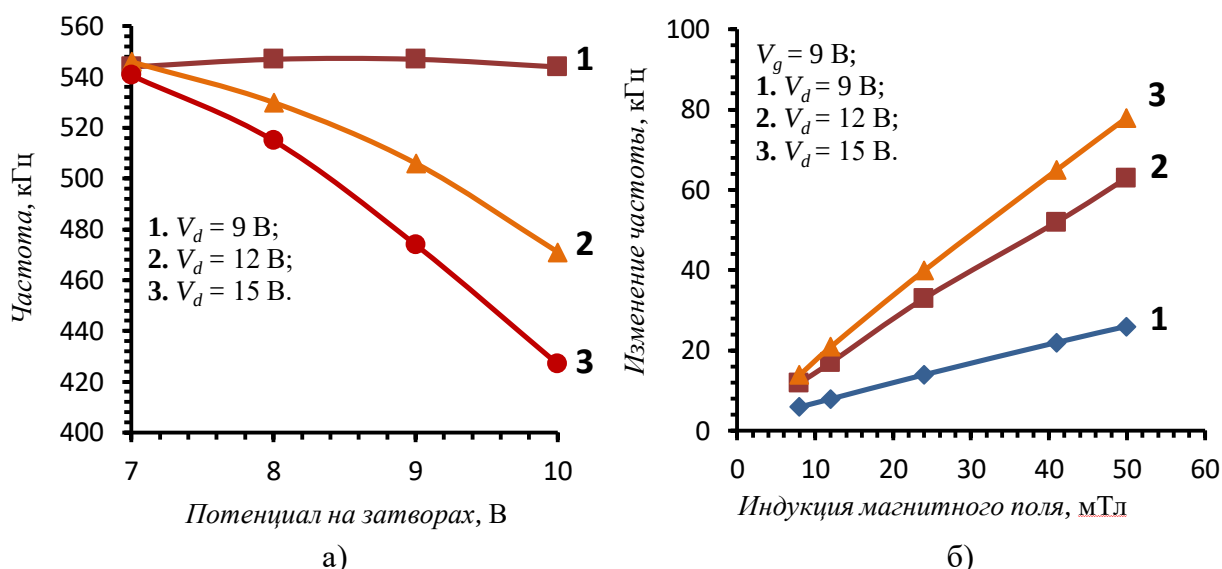


Рисунок 7 – Характеристики ДЧВ на основе мультивибраторной схемы: а) зависимость рабочей частоты от электрических режимов включения ПДХ; б) зависимость измерения рабочей частоты от индукции магнитного поля

Таблица 2 – Сравнение характеристик датчиков магнитного поля с частотным выходом, использующих ПДХ

Тип конструкции ДЧВ	Достигнутая крутизна управления рабочей частотой ДЧВ, кГц/В	Достигнутая абсолютная чувствительность к магнитному полю ($B=50$ мТл), Гц/мТл	Зависимость изменения частот от индукции магнитного поля
На основе скачков тока в ПДХ	1	48	Нелинейная
На основе схемы автогенератора	7	25	Линейная
На основе схемы мультивибратора	40	2200	Линейная

В пятой главе изучаются возможности ДЧВ температуры и ионизирующей радиации на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа. В них для корректности КНИ ЧЭ обозначены полевым датчиком температуры (ПДТ) и полевым датчиком ионизирующей радиации (ПДР), соответственно.

В главе рассматриваются следующие типы ДЧВ:

1. ДЧВ температуры с использованием ПДТ, включенного в схему автогенератора;
2. ДЧВ температуры на основе ПДТ и схемы мультивибратора;
3. ДЧВ ионизирующего излучения на основе ПДР, включенного в схему автогенератора.

Первый тип ДЧВ температуры использует схему с автогенератором на основе операционного усилителя. В ней изменение температуры регистрируется за счет изменения поперечного сопротивления ПДТ. Возможность температурных измерений такого ДЧВ продемонстрирована при изменении температуры ПДТ от комнатной до 55 °С.

В режиме насыщения тока канала ПДТ ($V_d > V_g$), чувствительность такого ДЧВ температуры в три раза выше, чем в режиме, соответствующем линейному участку ($V_d < V_g$) ВАХ ПДТ, и составляет 18 Гц/°С и 6 Гц/°С, соответственно. Таким образом,

изменение напряжения питания и потенциалов, поданных на затворы ПДТ, позволяет изменять чувствительность датчика температуры с частотным выходом.

Схема разработанного и исследованного температурного ДЧВ на основе мультивибратора с использованием ПДТ в качестве чувствительного элемента приведена на рисунке 8. В этой схеме ПДТ выступает в качестве термотранзистора и в совокупности с постоянным резистором R10 образует делитель напряжения V_{dt} .

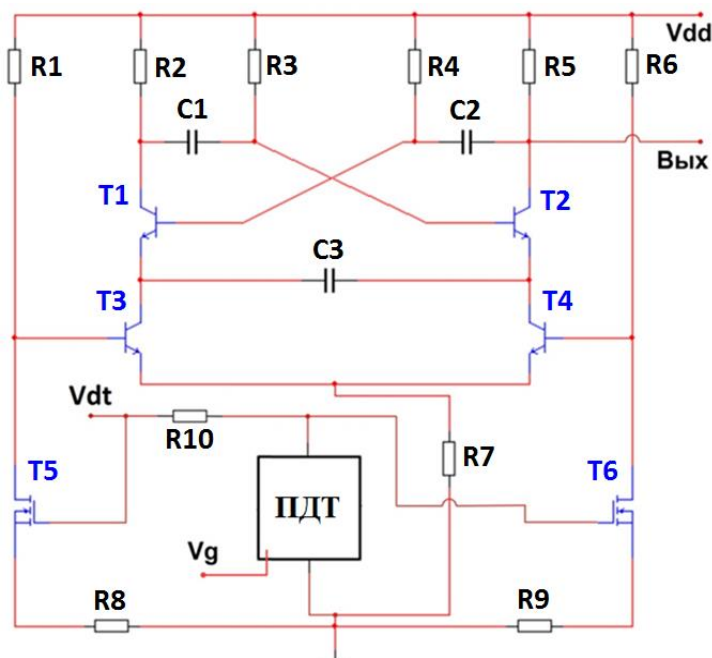


Рисунок 8 – Принципиальная схема температурного ДЧВ на основе ПДТ

Таким образом, на одном из управляющих частотой ДЧВ транзисторов зафиксировано напряжение V_{dt} , а на другом оно составляет определенную долю напряжения V_{dt} в зависимости от выбора номинала резистора R10, потенциала на затворах V_g и рабочей температуры T ПДТ. При этом измерительные контакты на боковых сторонах канала чувствительного элемента не используются.

На рисунке 9 представлены зависимости, характеризующие изменение частоты ДЧВ при изменении температуры. Видно, что ПДТ позволяет с помощью изменения рабочего режима варьировать рабочую частоту ДЧВ. Зависимости, измеренные в диапазоне температур от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, характерном для традиционных датчиков температуры линейны, а чувствительность к температуре достигает порядка $1.4\text{ кГц}/^{\circ}\text{C}$. Кроме того, видно, что МДПДМ полевое управление обеспечивает возможность регулирования рабочей частоты ДЧВ с крутизной порядка $20\text{ кГц}/\text{В}$. В работе также показано влияние выбора номинала сопротивления R10 на температурную чувствительность такого датчика с частотным выходом.

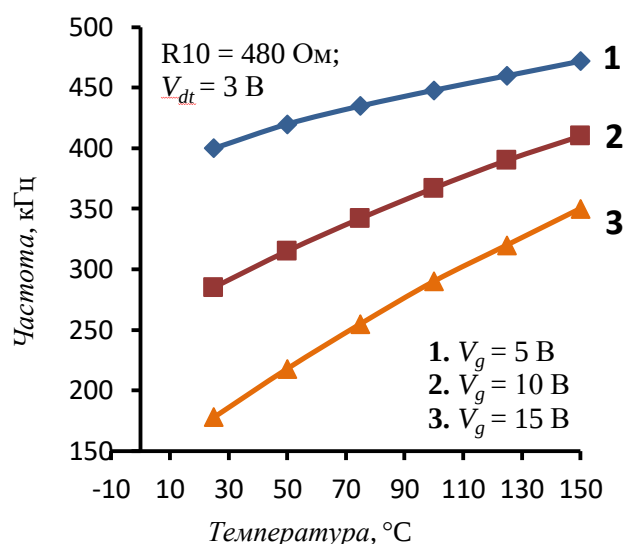


Рисунок 9 – Изменение частоты температурного ДЧВ при изменении температуры ПДТ

Возможность создания ДЧВ, регистрирующего радиационное ионизирующее излучение, на основе КНИ чувствительного элемента типа ПДР продемонстрирована в схеме автогенераторного ДВЧ с использованием операционного усилителя. Для этого ПДР подвергся воздействию γ -квантов изотопа ^{60}Co . Доза облучения составляла 30 крад. В процессе облучения напряжение на контактах питания и затворов ПДР отсутствовало. В таблице 5 приведены данные, характеризующие изменение частоты ДЧВ после облучения ПДХ. Изменение рабочей частоты ДЧВ вызвано тем, что облучение ПДХ сопровождается накоплением положительного заряда в подзатворных окислах SiO_2 и генерацией заряженных поверхностных состояний на границах раздела Si-SiO_2 . Это перераспределяет электрические поля в рабочем слое Si и изменяет ток канала, что в конечном итоге приводит к изменению рабочей частоты ДЧВ. Из результатов, приведенных в таблице 3, также видно, что изменение потенциалов на затворах ПДР при измерениях способно увеличивать чувствительность к воздействию радиационного ионизирующего облучения более, чем на порядок.

Таблица 3 – Влияние облучения на рабочую частоту и чувствительность ДЧВ на основе автогенератора

Образец ПДР	V_d , В	V_g , В	F , кГц	S , Гц/рад
Исходный	10	15	28.13	-
Облученный	10	15	20.22	260
Исходный	10	20	21.39	-
Облученный	10	20	20.74	20

Таким образом, КНИ ЧЭ транзисторного типа со встроенным каналом, МДПДМ полевой управляющей системой и измерительными контактами на боковых сторонах канала может быть использован для создания ДЧВ температуры и ионизирующей радиации. Изучение двух различных конструкций ДЧВ температуры позволило определить, что конструкция датчика на основе схемы автогенератора не позволяет разделить измерения магнитного поля и температуры, поскольку в обоих случаях

измерительным сигналом КНИ чувствительного элемента служит сигнал на холловских контактах, то есть неизбежным будет магнитный шум при измерении температуры и наоборот (это же касается и измерения воздействия ионизирующей радиации). ДЧВ на основе мультивибраторной схемы в свою очередь позволяет разделить результаты измерения температуры и магнитного поля. Это достигается за счет использования включения ПДТ в схему ДЧВ таким образом, что боковые контакты, служащие для измерения эффекта Холла, не используются, а элемент выступает в роли КНИ термотранзистора, управляемого электрическим полем (ПДТ). Такой ДЧВ обладает высокой чувствительностью к изменению температуры – до $1.4 \text{ Гц/}^{\circ}\text{C}$ (на два порядка выше, чем у ДЧВ на основе автогенератора - около $18 \text{ Гц/}^{\circ}\text{C}$).

Как было показано, ДЧВ на основе мультивибраторной схемы с практической точки зрения превосходит другие изучавшиеся конструкции ДЧВ. Имея более простое исполнение, не требующее использования усилителей, он обеспечивает на порядок более высокую крутизну управления рабочей частотой с помощью выбора потенциала затворов КНИ ЧЭ, на два порядка более высокую чувствительность к магнитному полю и температуре.

В **шестой главе** исследуется возможность оптимизации характеристик и функциональных возможностей ДЧВ на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа и мультивибраторной схемы.

С помощью моделирования схемы ДЧВ на основе мультивибратора в программе для схемотехнического проектирования и отладки Multisim определены требования к некоторым компонентам цепи управления рабочей частотой мультивибратора. В частности, определено, что для смещения диапазона рабочих потенциалов на затворах КНИ чувствительного элемента в область более высоких значений, что, как было показано в главе 3, способствует повышению рабочей температуры чувствительного элемента, необходимо использовать полевые транзисторы T5 и T6 цепи управления рабочей частотой мультивибратора с более высоким пороговым напряжением. Это подтверждается экспериментальными результатами, приведенными на рисунке 10а.

Также определено, что незначительное изменение сопротивлений R8 и R9 способно до нескольких раз повысить крутизну управления рабочей частотой датчика с частотным выходом с помощью потенциала на затворах КНИ чувствительного элемента в отсутствии внешнего воздействия. Экспериментальные данные, приведенные на рисунке 10б показывают, что повышение номинала сопротивления R9 на 2% приводит к росту крутизны управления рабочей частотой в три раза.

Поскольку КНИ чувствительный элемент со встроенным аккумулялированным каналом, МДПДМ полевым управлением и измерительными контактами на боковых сторонах канала может выступать в качестве универсального сенсорного элемента, способного регистрировать как минимум воздействие магнитного поля, температуры, а также накопленную дозу ионизирующего облучения, то на его основе могут быть созданы многофункциональные ДЧВ. В работе предложена схема универсального датчика с частотным выходом, способного последовательно регистрировать воздействие магнитного поля и температуры (рисунок 11). В этом случае КНИ чувствительный элемент для корректности назван полевым датчиком Холла и температуры (ПДХТ).

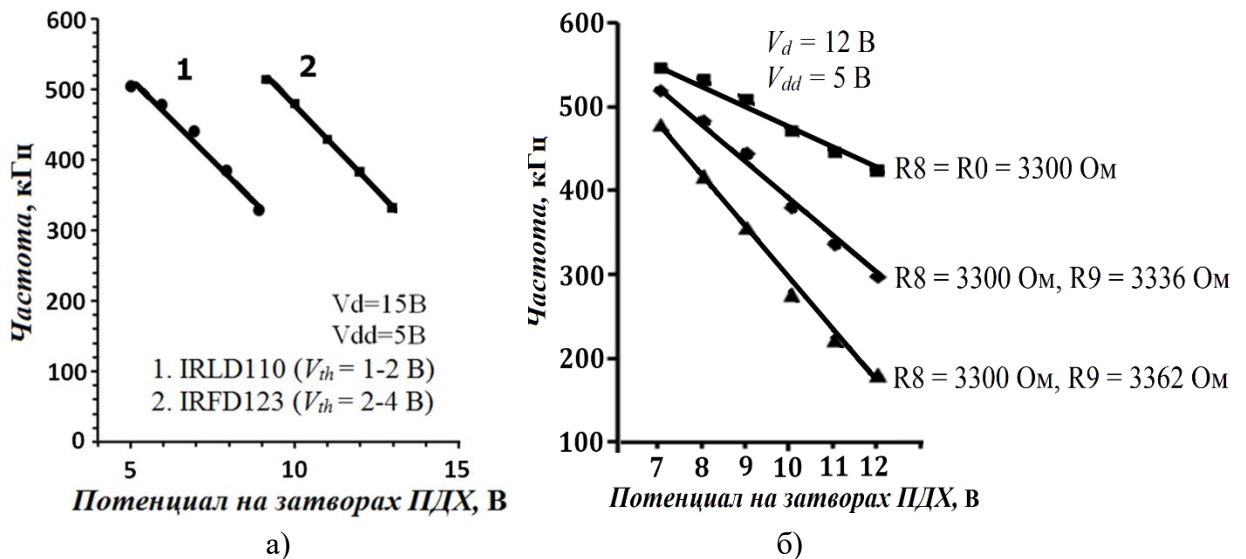


Рисунок 10 – а) Экспериментальные зависимости рабочей частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для двух пар транзисторов Т5 и Т6 с разными пороговыми напряжениями V_{th} ; б) зависимости выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для трех различных соотношений сопротивлений R_8 и R_9

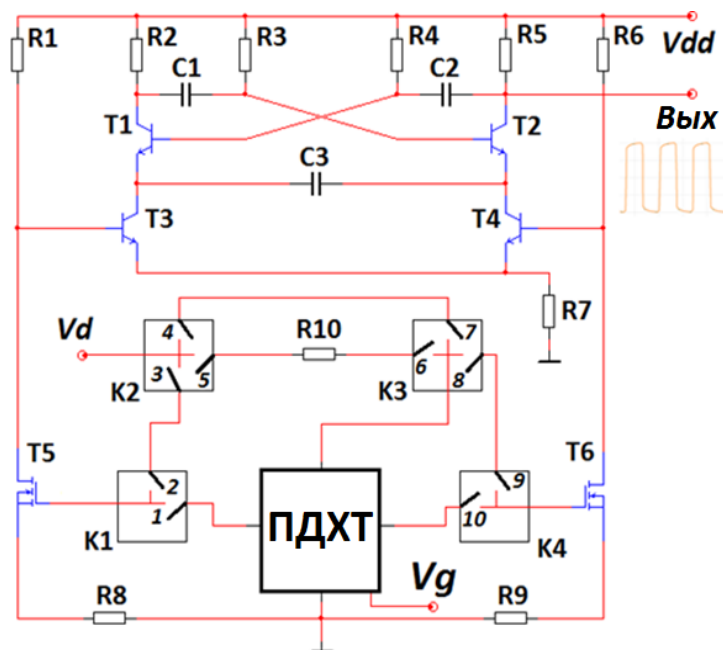


Рисунок 11 – Схема универсального датчика магнитного поля и температуры. К1-К4 – электронные ключи. Режим измерения магнитного поля: перемычки 1,4,7,10 замкнуты, остальные разомкнуты. Режим измерения температуры: перемычки 2,3,5,6,8,9 замкнуты, остальные разомкнуты

Последовательное измерение различных по природе внешних воздействий может происходить с помощью перекоммутации цепи питания ПДХТ и контактов, обеспечивающих наличие потенциалов на затворах транзисторов Т5 и Т6, с помощью электронных ключей К1-К4. Данные о температуре можно использовать для динамической калибровки датчика магнитного поля.

Стоит отметить, что в зависимости от специфики применения показания ряда универсальных датчиков с частотным выходом могут быть разделены по частоте с помощью управления рабочей частотой выбором потенциала на затворах КНИ чувствительного элемента транзисторного типа (рисунок 12). Таким образом, эта особенность обеспечивает датчикам свойство частотной многоканальности, которая может быть крайне полезна для многодатчиковых измерительных систем, в частности применяемых в устройствах концепции «интернет вещей»

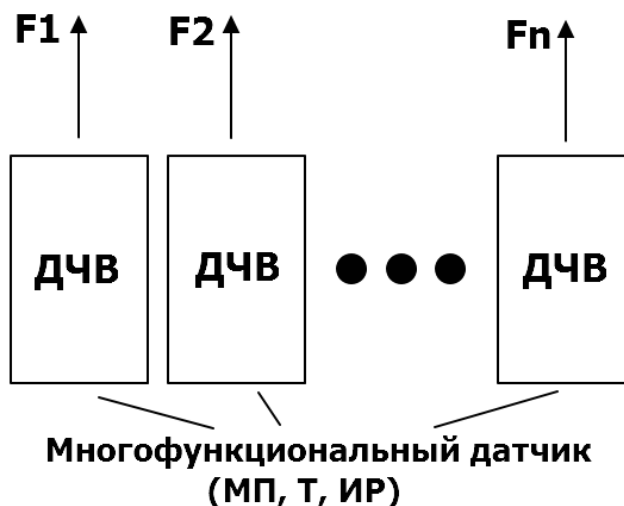


Рисунок 12 – Разделение информационного канала датчиков по частоте за счет выбора электрического режима КНИ ЧЭ

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Показано, что в канале исследуемого КНИ чувствительного элемента транзисторного типа со встроенным каналом, МДПДМ полевым управлением и имеющего противолежащие омические контакты на боковых сторонах канала, используемые для измерений эффекта Холла, наблюдается эффект зарядовой связи. Этот эффект сопровождается повышением подвижности электронов в аккумулированных токопроводящих областях ПДХ вследствие ослабления влияния рассеяния на границах раздела Si – SiO₂. Определены электрические режимы ПДХ, при которых использование эффекта зарядовой связи позволяет повысить пороговую магниточувствительность ПДХ до двух раз.

2. Экспериментально показано, что предложенная универсальная конструкция КНИ чувствительного элемента с МДПДМ полевой управляющей системой и дополнительными измерительными контактами на боковых сторонах рабочего слоя кремния, обеспечивает возможность измерения различных внешних воздействий (магнитного поля, температуры, ионизирующей радиации).

3. Проведено физическое моделирование предельной рабочей температуры, которая может быть достигнута в КНИ магниточувствительных элементах транзисторного типа со встроенным каналом на примере полевого датчика Холла. В модели анализируется в какой мере повышение потенциала управляющих затворов, определяющего концентрацию электронов в аккумулированных областях, позволяет пренебречь утечкой тока,

обусловленной повышением концентрации термогенерированных носителей в частично обедненной области канала по мере увеличения температуры. Показано, что конкретное значение допустимых температур может достигать порядка 575 °С в случаях использования чувствительного элемента такого типа в датчиках с аналоговым представлением информации. В тоже время при использовании чувствительных элементов типа ПДХ в датчиках с цифровым выходом предельная температура может достигать значений 700 °С. Таким образом, предельная рабочая температуры КНИ магниточувствительных элементов транзисторного типа со встроенным каналом и МДПДМ полевым управлением существенно превышает таковую для традиционных кремниевых ЭХ, составляющую 150 – 170 °С, и для КНИ МОП транзисторов, составляющую 200 – 220 °С.

4. Исследована возможность реализации различных физических принципов для преобразования внешних воздействий в частоту, используя КНИ чувствительных элементов транзисторного типа в качестве первичного преобразователя. Показано, в частности, что особенности вольт-амперной характеристики полевого датчика Холла на участке лавинного умножения носителей, могут быть положены в основу преобразования магнитного воздействия в частотный выходной сигнал без применения традиционных автогенераторных схем.

5. Установлено, что оптимальной схемой для датчика различных внешних воздействий с частотным выходом на основе КНИ ПДХ является схема мультивибратора, электрические режимы транзисторов которого управляются сигналом ПДХ, индуцированным внешним воздействием. Принципиальным отличием схемы, использующей ПДХ в качестве чувствительного элемента, является возможность управления рабочей частотой мультивибратора в широких пределах с помощью выбора электрического режима работы ПДХ. Показано, что изменения рабочей частоты датчика зависят от интенсивности внешнего воздействия. Чувствительность таких преобразователей к магнитному полю достигает 2.2 кГц/мТл, к температуре – 1.4 кГц/°С. Крутизна управления частотой с помощью потенциалов затворов КНИ чувствительного элемента составляет 40 – 60 кГц/В.

6. Проведено моделирование параметров мультивибраторной схемы датчика магнитного поля с частотным выходом в программе Multisim и определены требования к транзисторам цепи управления рабочей частотой, определяющие линейность преобразования магнитного поля в изменение частоты в широком диапазоне температур.

7. Показано, что КНИ чувствительный элемент транзисторного типа может быть использован в датчиках с частотным выходом для преобразования воздействия ионизирующей радиации в частоту.

8. На примере измерений магнитного поля и температуры показано, что конструкция КНИ чувствительного элемента транзисторного типа со встроенным каналом, полевым МДПДМ управлением и измерительными холловскими контактами может быть использована для создания многофункционального многоканального ДЧВ на основе мультивибраторной схемы, обеспечивающего последовательное измерение магнитного поля и температуры в рамках единой конструкции ДЧВ.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Мурашев В. Н., Пажин Д. М. Датчики внешних воздействий с частотным выходом на основе полевого МДПДМ-транзистора со встроенным каналом // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 10(159). С. 8–11.
2. Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Тонкопленочный кремниевый магниточувствительный полевой транзистор холловского типа с расширенным до 350°C диапазоном рабочих температур // Письма в Журнал Технической Физики. 2016. Т. 42. № 2. С. 30–36.
3. Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Автогенераторная схема преобразователя индукция–частота на основе полевого датчика Холла с регулируемой частотой // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 5. С. 59–61.
4. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. Field Controlled Si Hall Element with Extended Operation Temperature Range from Liquid Helium Temperature up to 650K // Procedia Engineering. 2015. V. 120. P. 1197–1200.
5. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. The Thin-Film SOI Magnetotransistor with the Extended Operating Temperature Range from liquid Helium Up to 650K // Conference abstracts. 3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint Petersburg OPEN 2016”. St Petersburg, Russia, 2016. P. 296–297.
6. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. Sensors with SOI FET Primary Transducers and Frequency // Proceedings of 17th International Conference on Sensors and Measurement Technology SENSOR 2015. Nuremberg, Germany, 2015. P. 864–867.
7. Малых А. А., Мурашев В. Н. Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе КНИ полевого датчика Холла // Тезисы докладов 23-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2016». Москва, 2016. С. 120.
8. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. Magnetic Field to Frequency Converter that Uses Double Gate SOI FET Sensing Element // Proceedings of International Siberian Conference On Control and Communications SIBCON 2015. Omsk, Russia, 2015.
9. Малых А. А., Мурашев В. Н. Датчик магнитного поля с управляемым частотным выходом на основе бистабильного мультивибратора и полевого датчика Холла в качестве чувствительного элемента // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 2016. № 1(161). С. 18–22.
10. Малых А. А., Леонов А. В., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Кремниевый полевой датчик Холла с расширенным диапазоном рабочих температур // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 104–108.
11. Leonov A.V., Malykh A.A., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I. Multifunctional sensor with frequency output based on SOI TFT double-gate sensing element // Conference abstracts. 2nd International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumental Advances (SEIA' 2016). Barcelona, Spain, 2016.
12. Малых А.А., Павлюк М.И. Микроэлектронный многофункциональный и многоканальный датчик с частотным выходом на основе КНИ тонкопленочного МДПДМ транзистора в качестве чувствительного элемента // Сборник трудов Международной

Список использованных источников:

- [Л1] Colinge J. P. Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI. Springer Science & Business Media, 2004. P. 373.
- [Л2] Моркдкови В. Н., Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мокрушин А. Д., Омеляновская Н. М., Пажин Д. М. Полевой датчик Холла – новый тип преобразователя магнитного поля // Датчики и системы. 2003. № 7. С. 33–37.
- [Л3] Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Mordkovich V. N., Pazhin D. M. The features of magnetosensitive sensors based on a field-effect Hall probe // Instruments and Experimental Techniques. 2012. V. 55. № 6. P. 701–708.
- [Л4] Леонов А. В., Павлюк М. И. Стабилизатор микро- и малых токов на основе полевого датчика Холла с функцией автокомпенсации влияния температуры // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 1–3.
- [Л5] Нинидзе Г. К., Павлюк С. П., Ищук Л. В., Кушниренко В. В. Использование КНИ-транзистора в качестве генератора колебаний напряжения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 3. С. 54–57.
- [Л6] Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мордкович В. Н., Пажин Д. М. Особенности магниточувствительных сенсоров на основе Полевого Датчика Холла // Приборы и техника эксперимента. 2012. Вып. 6. С. 1–8.
- [Л7] Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негатронов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 5–6. С. 19–22.
- [Л8] Popovic R. S. Hall effect devices. Second edition. CRC Press, 2003. P. 412.