

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р тех. наук, профессор Мурашев Виктор Николаевич

Москва 2016 г.

Содержание:

Список использованных сокращений	5
Введение	6
Глава 1. Литературный обзор	15
1.1 Полевой датчик Холла на основе технологии «кремний на изоляторе».	15
1.2 Датчики с частотным выходом	18
1.3 Датчики с частотным выходом на основе полупроводниковых чувствительных элементов с собственными осцилляциями	19
1.4 Датчики с частотным выходом на основе чувствительных элементов с осцилляторным эффектом	23
1.5 Датчики с частотным выходом на основе автогенераторных схем	30
1.6 Датчики с частотным выходом на основе схем транзисторных аналогов негатронов	35
Глава 2. Объекты исследования и методика проведения экспериментов	41
2.1 Полевой датчик Холла. Конструктивные особенности и методика изготовления	41
2.2 Методика исследования характеристик ПДХ и применяемая для этого аппаратура	43
2.3 Схемы исследуемых датчиков с частотным выходом	45
2.4 Аппаратура, применяемая для исследования выходного сигнала ДЧВ	47

Глава 3. Исследование полевого датчика Холла	49
3.1 Эффект зарядовой связи в канале ПДХ	49
3.2 Основные электрофизические свойства ПДХ	55
3.3 Анализ предельных рабочих температур ПДХ.....	62
3.4 Выводы к главе	76
Глава 4. Датчики магнитного поля с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа.....	78
4.1 Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе скачков тока в канале ПДХ.....	78
4.2 Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе ПДХ, включенного в схему автогенератора	84
4.3 Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе ПДХ и схемы мультивибратора	86
4.4 Выводы к главе	96
Глава 5. Датчики температуры и радиации с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа	98
5.1 Датчик температуры с частотным выходом с использованием ПДТ, включенного в схему автогенератора	98
5.2 Датчик температуры с частотным выходом на основе ПДТ и схемы мультивибратора	100
5.3 Датчик ионизирующей радиации с частотным выходом с использованием ПДР, включенного в цепь автогенератора	104

5.4 Выводы к главе	105
Глава 6. Некоторые аспекты оптимизации характеристик и функциональных возможностей ДЧВ на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа и схемы мультивибратора.....	107
6.1 Оптимизация за счет выбора элементной базы ДЧВ	107
6.2 Расширения функциональных возможностей дчв за счет универсального чувствительного элемента	111
6.2 Выводы по главе	114
Основные выводы работы	116
Список использованных источников	120

Список использованных сокращений

БСС – беспроводные сенсорные сети;

ДЧВ – датчики с частотным выходом;

КНИ – кремний на изоляторе;

МДПДМ – металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл;

ПДХ – полевой датчик Холла;

ПДХТ – полевой датчик Холла и температуры;

ПДТ – полевой датчик температуры;

ПДР – полевой датчик ионизирующей радиации;

ЭХ – элемент Холла;

ВАХ – вольт-амперная характеристика;

ГМР – гигантская магниторезистивность;

Введение

Датчики – это устройства, способные воспринимать внешние воздействия и реагировать на них изменениями электрических сигналов [1]. Датчики служат для регистрации определенных свойств у исследуемого объекта, либо для наблюдения за этими свойствами, такими, например, как магнитное поле, температура и т.д. Развитие полупроводниковых технологий во второй половине двадцатого века определило появление целого направления новых устройств – полупроводниковых микроэлектронных чувствительных элементов [1-5], а в настоящее время и микроэлектронных интегральных датчиков, совмещающих на одном кристалле чувствительный элемент и специальную схему обработки сигнала [6,7].

Датчики физических величин являются одним из наиболее востребованных на сегодняшний день продуктов микроэлектронной промышленности. Производство и потребление датчиков исчисляется миллиардами штук ежегодно. На их применении в значительной мере основаны автоматизация различных технологических процессов, а также системы контроля и управления различными агрегатами и механизмами. Датчики находят свое применение практически во всех отраслях жизнедеятельности современного человека, поэтому их роль сложно недооценивать. Одно только автомобильное производство имеет потребность в более чем миллиарде датчиков магнитного поля ежегодно [8].

Датчик состоит из двух ключевых элементов. Первый – это чувствительный элемент, выходные характеристики которого зависят от типа (или нескольких типов) внешнего воздействия и его интенсивности. Второй представляет собой специальную схему обработки выходного сигнала чувствительного элемента, зависящую от специфики применения устройства. Схема обработки сигнала необходима для преобразования аналогового сигнала чувствительного элемента в соответствующую для согласования с контрольно-измерительными блоками форму. Зачастую основными

элементами схем обработки являются усилители и аналогово-цифровые преобразователи, однако существуют и иные подходы.

Из года в год все активнее применяются радиочастотные датчики с беспроводной связью с контрольно-измерительной аппаратурой. Такие устройства могут использоваться в медицинских [9-11], спортивных, автомобильных, космических и других приборах [12]. Применение такого типа взаимодействия датчиков с контрольной аппаратурой позволяет полностью избавиться от части коммутационных проводов, тем самым, улучшив массогабаритные параметры системы контроля, что крайне существенно, например, при использовании датчиков в многодатчиковых системах измерения физических свойств объектов, в частности в бортовых системах космических летательных аппаратов.

Кроме того, в настоящее время активно развиваются и внедряются беспроводные сенсорные сети (БСС) и измерительные комплексы. Активное развитие микроэлектронных технологий и технологий беспроводной передачи данных делают применение БСС экономически привлекательным и доступным. В связи с этим количество потребителей БСС непрерывно увеличивается. Область применения БСС охватывает транспорт, промышленность, коммунальное хозяйство, системы охраны и слежения, быт и другие, включая портативные измерительные системы [13].

В указанных приборах могут применяться датчики с частотным выходом (ДЧВ) в виду их особенностей и некоторых преимуществ перед датчиками с традиционным выходом по току или напряжению.

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

Потребность в высокотемпературных датчиках и датчиковых системах растет с каждым годом [14] и в течение последних нескольких лет имеет

устойчивую тенденцию к повышению, это видно из зависимостей, представленных на рисунке 1 [15]. Как правило, для повышения предельных рабочих температур используются чувствительные элементы на основе широкозонных полупроводников, либо специальные охлаждающие системы. Однако использование микроэлектронных чувствительных элементов на основе широкозонных полупроводников снижает экономическую эффективность производства, а применение специальных систем охлаждения к тому же приводит к значительному ухудшению массогабаритных параметров. При этом существуют области применения датчиков, например, в автомобильной и авиационной промышленности, при бурении глубоких скважин, космической отрасли и в других сферах, в которых использование специальных охлаждающих систем является крайне затруднительным.

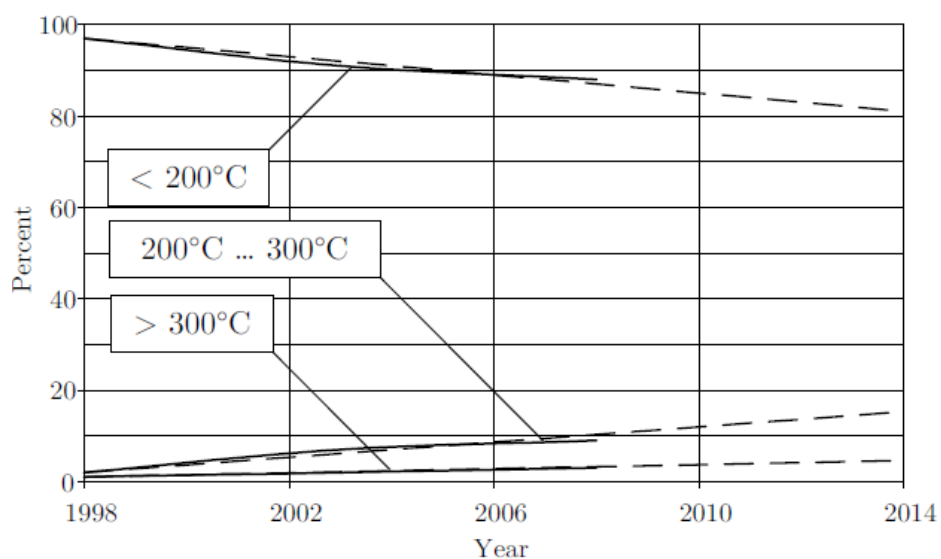


Рисунок 1 – Потребление микроэлектронных компонентов с различными предельными температурами за последние годы

Цель 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.

Решаемые задачи.

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.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и основных выводов работы. В ней 127 страниц, 71 рисунок, 10 таблиц, библиография насчитывает 61 источник.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, перечислены решаемые в работе задачи, сформулированы положения научной новизны, практической полезности и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору. В ней обоснован выбор конструкции КНИ МОП - транзистора с двойным МДПДМ полевым управлением, интегрированного с элементом Холла (на примере ПДХ), в качестве чувствительного элемента датчиков с частотным выходом. Проведен анализ методов построения датчиков по принципу преобразования внешних воздействий в изменение частоты электрического сигнала – датчиков с частотным выходом.

Вторая глава посвящена описанию полевого датчика Холла, его конструктивных особенностей, способу изготовления, приведены методика измерения основных параметров и измерительные приборы, для этого используемые. Кроме того, в главе приводятся разработанные схемы датчиков с частотным выходом, использующие КНИ чувствительный элемент типа ПДХ, методика измерения их выходных частотных характеристик и измерительные приборы для этого используемые.

В третьей главе приведены результаты исследования эффекта зарядовой связи в канале ПДХ, основных электрических характеристик ПДХ, в том числе для температурного диапазона до 150 °С. Приведены результаты анализа предельной рабочей температуры ПДХ.

Четвертая глава посвящена изучению характеристик датчиков магнитного поля с частотным выходом, использующих КНИ ПДХ в качестве чувствительного элемента. Приведены экспериментальные характеристики датчика магнитного поля с частотным выходом на основе эффекта скачков

тока в ПДХ, сформулированы особенности такого подхода. Приведены результаты исследований датчика с частотным выходом на основе схемы автогенератора с использованием ПДХ в качестве чувствительного элемента. Приведены результаты моделирования датчика магнитного поля с частотным выходом на основе схемы мультивибратора в программе для моделирования и отладки электронных схем Multisim 12, а также экспериментальные результаты исследования такой конструкции датчика магнитного поля.

В пятой главе приведены результаты исследования возможности регистрации температурного и радиационного воздействия датчиками с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа с МДПДМ управлением и дополнительными измерительными контактами на боковых сторонах канала (на примере полевого датчика температуры – ПДТ, и полевого датчика ионизирующей радиации – ПДР). Показано, что конструкция датчика с частотным выходом, использующая включение КНИ ПДТ в схему мультивибратора позволяет разделить измерения магнитного поля и температуры, не прибегая к принципиальному изменению конструкции датчика. На примере ДЧВ, использующего ПДР в схеме автогенератора на операционном усилителе, показана возможность создания ДЧВ ионизирующей радиации.

В шестой главе рассматриваются некоторые аспекты оптимизации характеристик и функциональных возможностей ДЧВ на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа и мультивибраторной схемы.

В выводах обобщаются результаты работы и сделаны основные выводы по диссертации.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015, Россия, Омск, 2015 г.

2. 17th International Conference on Sensors and Measurement Technology SENSOR 2015, ФРГ, Нюрнберг, 2015 г.

3. Международная конференция EUROSENSORS 2015, ФРГ, Фрайбург, 2015 г.

4. Школа-конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN 2016", Россия, Санкт-Петербург, 2016 г.

5. 23-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2016», Россия, Москва, 2016 г.

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.

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.

Глава 1. Литературный обзор

В представленной главе:

- обоснован выбор КНИ чувствительного элемента транзисторного типа с двойным МДПДМ полевым управлением (на примере ПДХ) в качестве чувствительного элемента датчиков с частотным выходом;
- обоснованы преимущества датчиков, основанных на преобразовании внешнего воздействия в частоту электрического сигнала – датчиков с частотным выходом (ДЧВ);
- рассмотрены основные способы создания датчиков с частотным выходом.

1.1 Полевой датчик Холла на основе технологии «кремний на изоляторе».

Из литературы известен оригинальный чувствительный элемент - полевой датчик Холла [16,17,18]. ПДХ выполнен в тонком слое $n^+ - n - n^+$ слое кремния КНИ структуры и представляет собой двухзатворный МОП транзистор с двумя дополнительными измерительными контактами на боковых противоположных сторонах канала. Рабочий режим - режим аккумуляции электронов у границ подзатворных диэлектриков. Таким образом, ПДХ является гибридом полевого МОП транзистора со встроенным каналом аккумулятированного типа и двойным МДПДМ полевым управлением и традиционного кремниевого чувствительного элемента холловского типа (рисунок 2), выходными характеристиками которого можно управлять с помощью эффекта поля. Полевой датчик Холла был разработан и изучен в России.

ограничено не физическими свойствами ПДХ, а особенностями использованных корпусов. В то же время, нижний температурный предел соответствует температуре жидкого гелия. Благодаря использованию режима аккумуляции электронов с помощью эффекта поля, ток в канале ПДХ протекает даже в случае, когда примесные атомы в Si неионизированы [18].

- повышенная устойчивость к радиационным воздействиям. Наличие двух близко расположенных границ кремния со встроенным и подзатворным диэлектриком в КНИ элементе оказывает существенное воздействие на поведение междоузельных атомов и вакансий, рожденных облучением. Скорость образования устойчивых радиационных дефектов в канале значительно меньше, чем в объемных монокристаллах. Определенную роль в этом играют упругие и электрические поля в слое кремния КНИ структуры [19];

- 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 [20].

Таким образом, применение КНИ чувствительных элементов типа ПДХ для создания различных типов датчиков представляет большой интерес в научном и практическом плане. Использование такого чувствительного элемента позволяет создавать интегральные датчики по кремниевой технологии, способные, кроме того, обладать при изготовлении с использованием КНИ структур повышенной стойкостью к экстремальным воздействиям среды эксплуатации, в частности иметь рекордно широкий диапазон рабочих температур. Двухзатворная МДПДМ полевая управляющая система позволяет в широких пределах варьировать электрофизические параметры КНИ ПДХ, а также создавать оригинальные схемы датчиков с частотным выходом на основе такого чувствительного элемента. Такие возможности в том числе могут быть использованы для создания на основе

ПДХ датчиков с управляемым частотным выходом, то есть датчиков, в которых ПДХ помимо регистрации внешних воздействий позволяет регулировать исходную частоту электрического сигнала в отсутствии внешнего воздействия, что может быть полезно как для динамической калибровки ДЧВ с его применением, так и для создания сенсорных многодатчиковых систем с разделением по частоте. Эти возможности изучаются в дальнейших главах.

1.2 Датчики с частотным выходом

В датчиках с частотным выходом, изменение частоты электрического сигнала на выходе пропорционально интенсивности внешнего воздействия. Устойчивый интерес к их разработке обусловлен рядом особенностей и преимуществ перед традиционными датчиками, представляющими выходной сигнал в виде тока или напряжения. Частотная форма выходного сигнала, обеспечивает возможность организации помехозащищенной беспроводной связи с функциональными блоками аппаратуры. Это может быть крайне полезно для широкого ряда применений [9-12,21]. Устройства, основанные на таком методе преобразования, могут иметь сравнительно малую стоимость, и при этом быть высокоточными передатчиками данных. Кроме того, метод преобразования воздействия в частоту позволяет повысить рабочую частоту, повысить 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.

Для применения в БСС важным преимуществом является форма выходного сигнала ДЧВ. Поскольку сигнал, передаваемый в виде частоты, фактически представляет собой последовательный цифровой код, то он обладает преимуществами цифровых систем [22]. Информация, таким образом, закодирована в частоту и может быть передана на микроконтроллер

элементарной регистрирующей ячейки БСС-«нода» через единственный цифровой порт. Эта особенность дает возможность использовать в «нодах» микроконтроллеры с ограниченным количеством цифровых входов. Поэтому применение ДЧВ в сенсорных ячейках, функционирующих в составе БСС, позволяет повысить экономическую эффективность производства и внедрения БСС, расширить сферы применения и количество потребителей.

Чаще всего микроэлектронные датчики с частотным выходом основаны на применении полупроводниковых приборов с собственными осцилляциями тока или напряжения, либо на применении специальных осциллирующих схем с входящим в их состав чувствительным элементом определенного типа.

1.3 Датчики с частотным выходом на основе полупроводниковых чувствительных элементов с собственными осцилляциями

Полупроводниковых приборы с внутренней положительной обратной связью, имеющие на вольт-амперной характеристике участки с отрицательным дифференциальным параметром (S- и N-образные ВАХ) [23,24] при определенных режимах работы, называются негатронами [25] и могут быть использованы для создания генераторов электрических колебаний, выходная частота которых пропорционально изменяется при внешнем воздействии. К полупроводниковым негатронам относятся: туннельный диод, лавинный транзистор, лавинно-пролетный диод, лавинно-пролетный транзистор, диод Ганна, динистор и другие полупроводниковые приборы [26]. Развитию твердотельной негатроники было положено начало с открытием эффекта отрицательного сопротивления в стеклообразных полупроводниках [27,28].

В [29] рассматривается кремниевый однопереходный магнитотранзистор с S-образной ВАХ. При помещении такого транзистора в магнитное поле на инжектированные носители действует сила Лоренца,

отклоняющая их к стенкам базы. Удельная чувствительность такого прибора может достигать 2×10^3 В/(А×Тл). В статье отмечено, что на базе такого транзистора может быть создан генератор, являющийся датчиком магнитного поля с частотным выходом. В статье [30] авторы предлагают варианты датчиков давления с частотным выходом на основе кремниевых однопереходных тензотранзисторов. Представленные на рисунке 3 схемы различаются использованием однопереходного тензотранзистора с дополнительным управляющим р-п переходом на рисунке 3б. Зависимости частоты электрических импульсов от величины воздействующего на транзисторы давления показаны на рисунке 4.

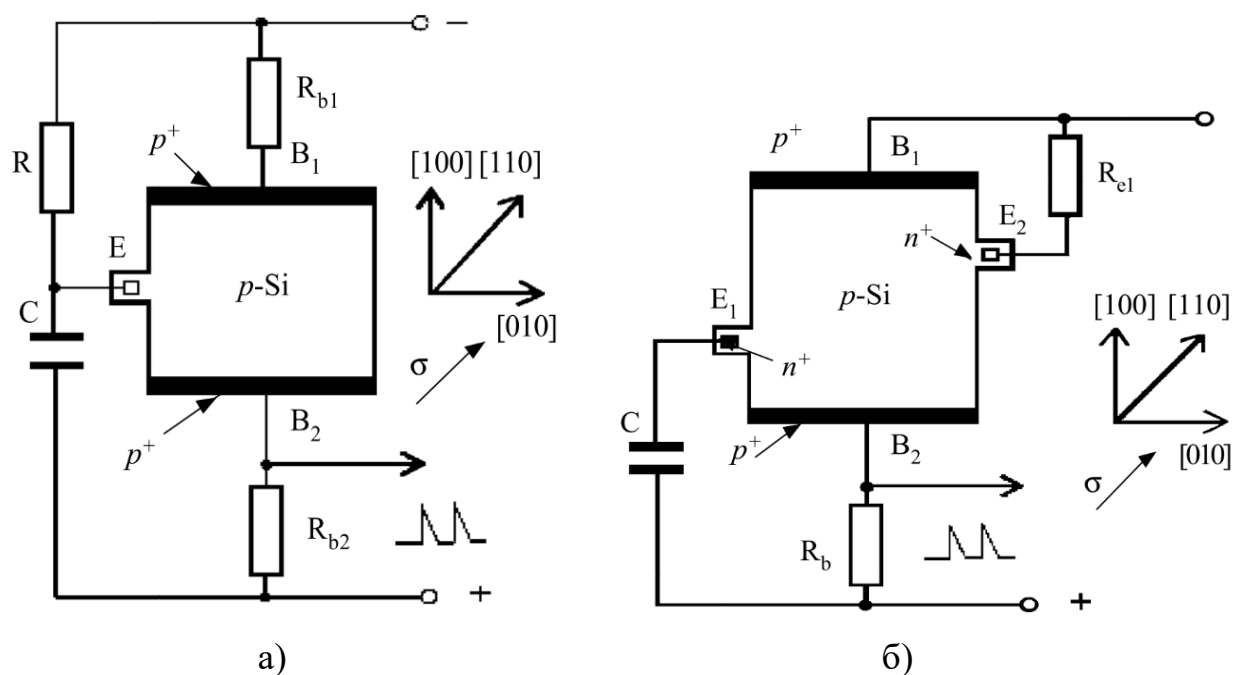


Рисунок 3 – Схемы датчиков давления с частотным выходом на основе однопереходного тензотранзистора (а) и на основе однопереходного тензотранзистора с дополнительным управляющим р-п переходом (б)

Из рисунков видно, что датчик, использующий однопереходный тензотранзистор с дополнительным управляющим р-п переходом имеет большую чувствительность при равной амплитуде воздействующего механического напряжения.

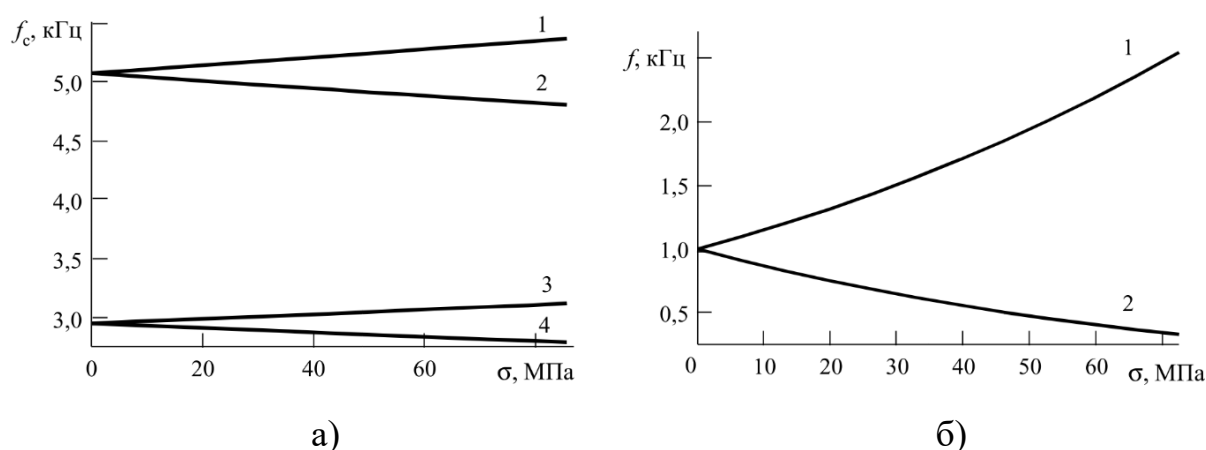


Рисунок 4 – Зависимости частоты выходного сигнала от амплитуды воздействующего на тензотранзисторы механического напряжения: а) датчик на основе однопереходного тензотранзистора: 1,3 – сжатие; 2,4 – растяжение; 1,2 – напряжение между базовыми контактами В1 и В2 равно 6В; 3,4 – напряжение между базовыми контактами В1 и В2 равно 4В; б) датчик на основе однопереходного тензотранзистора с дополнительным управляющим контактом: 1 –напряжение сжатия; 2 – напряжение растяжения

В качестве генератора можно использовать КНИ-транзистор, питающийся в режиме, близком к генератору тока [31]. Появление колебаний тока в КНИ транзисторе объясняется периодическим возникновением и исчезновением шнура тока, возникающего у стока транзистора при высокой напряженности электрического поля. Схема включения КНИ транзистора и осциллограммы показаны на рисунке 5. Отмечено, что частоту колебаний можно регулировать в пределах от 0.1 МГц до 1 МГц. Из общих физических представлений очевидно, что частота осцилляций данного прибора будет зависеть от факторов (температура, давление и др.), оказывающих воздействие на электрофизические свойства используемого КНИ-транзистора. Таким образом, данная схема может быть изучена в качестве датчика с частотным выходом.

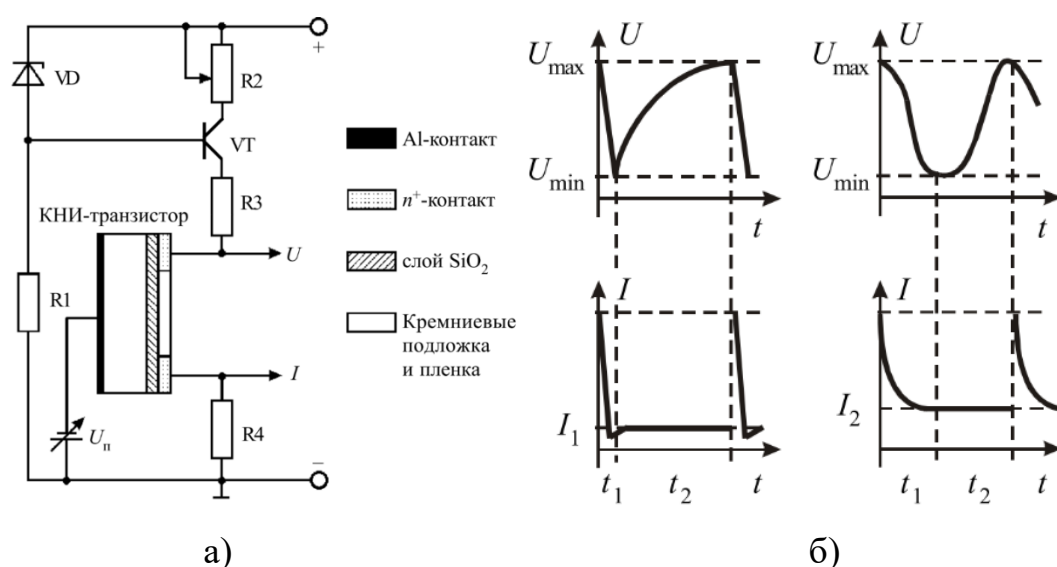


Рисунок 5 – Схема генератора на КНИ-транзисторе (а) и осциллограммы колебаний напряжения и тока в транзисторе при различных токах источника питания (б)

В работе [32] предлагаются характеристики датчиков различных воздействий с частотным выходом на основе образцов сильно компенсированного кремния, легированного марганцем, в которых наблюдается автоколебания тока типа температурно-электрической неустойчивости. В сильно компенсированном кремнии при комнатной температуре концентрация равновесных носителей тока становится на порядки меньше, чем концентрация ионизованных атомов ($n_0, p_0 < N_a^-, N_d^+$), а с понижением температуры эта разница ещё больше увеличивается. В этом случае система находится в крайне неравновесном состоянии и воздействие внешних факторов (температуры, освещенности, давления, электрического и магнитного поля) приводит к существенному изменению электрофизических параметров материала. В таблице 1 приводятся основные характеристики преобразователей на основе образцов сильно компенсированного кремния с температурно-электрической неустойчивостью.

Таблица 1 – Характеристики датчиков с частотным выходом на основе образцов сильно компенсированного кремния с температурно-электрической неустойчивостью

Область применения	Коэффициент чувствительности			
	По пороговому полю	По пороговой частоте	По амплитуде колебаний	По частоте колебаний
Термодатчик	$(2 \div 3) \frac{B}{\text{см}} \cdot K$	$(1 \div 2) \cdot 10^2 \frac{Гц}{K}$	$(2 \div 3) \cdot 10^{-6} \frac{A}{K}$	$(1 \div 2) \cdot 10^2 \frac{Гц}{K}$
Фотодатчик	$(4 \div 5) \frac{B}{\text{см}} \cdot Лк$	$(2 \div 3) \cdot 10^2 \frac{Гц}{Лк}$	$(3 \div 4) \cdot 10^{-6} \frac{A}{Лк}$	$(4 \div 5) \frac{Гц}{Лк}$
Тензодатчик	$(3 \div 5) \cdot 10^8 \frac{B}{\text{см}} \cdot Па$	$(3 \div 4) \cdot 10^{-6} \frac{Гц}{Па}$	$(2 \div 3) \cdot 10^{-10} \frac{A}{Па}$	$(1 \div 2) \cdot 10^{-5} \frac{Гц}{Па}$
Магнитодатчик	$(3 \div 4) \cdot 10^{-3} \frac{B}{\text{см}} \cdot Эрс$	$(4 \div 5) \cdot 10^3 \frac{Гц}{Эрс}$	$(6 \div 7) \cdot 10^{-11} \frac{A}{Эрс}$	$(4 \div 6) \cdot 10^{-2} \frac{Гц}{Эрс}$

1.4 Датчики с частотным выходом на основе чувствительных элементов с осцилляторным эффектом

В литературе описываются датчики с частотным выходом на основе осцилляторного эффекта. Осциллятор - полупроводниковый образец, генерирующий регулярные, близкие к синусоидальным, колебания переменного тока при помещении его в магнитное поле, вектор индукции которого параллелен протекающему току [33]. Возникновение колебаний связано с явлением винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы в полупроводниках, помещенных в магнитное поле, вектор которого совпадает с направлением протекающего тока (заданному значению напряжения электрического поля E соответствует некоторое пороговое значение индукции магнитного поля B). Частота и амплитуда колебаний изменяются соответственно изменению измеряемой величины. На частоту генерации влияют такие факторы как: температура, магнитное поле, давление на кристалл, электрическое поле в образце, угол между векторами электрического и магнитного поля [33,34].

В [35] описан чувствительный элемент, представляющий собой кремниевый осциллятор, помещенный в магнитный зазор между двумя малогабаритными магнитами из сплава FeNdB. Работоспособность датчика на основе кремниевого осциллятора исследована в диапазоне температур от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+63\text{ }^{\circ}\text{C}$ при питании его импульсным напряжением прямоугольной формы для исключения влияния джоулева нагрева кристалла на измерительную характеристику датчика. Во всем исследованном диапазоне температур при импульсном напряжении питания $U^* = 65\text{ В}$ частотно-температурная характеристика нелинейная, но ее можно линеаризовать в дискретных интервалах температуры, изменяя величину напряжения питания. Параметры осцилляторного датчика температуры приведены в таблице 2.

Авторы отмечают, что снижение температуры улучшает чувствительность датчика, снижает потребляемую электрическую мощность и делает возможным работу датчика в непрерывном режиме при питании постоянным напряжением от низковольтных источников. Однако необходимые для эффективной работы датчика пониженные температуры и высокие напряжения питания могут существенно осложнить применение подобных приборов в устройствах массового сегмента.

Таблица 2 – Параметры осцилляторного датчика температуры с частотным выходом

$U^*, \text{ В}$	$T, ^{\circ}\text{C}$	$dF/dT, \text{ Гц}/^{\circ}\text{C}$	<i>Интервал частот, кГц</i>
10	$-195 \div -84$	10700	$1900 \div 700$
20	$-84 \div -20$	14800	$1250 \div 300$
30	$-20 \div 0$	6200	$425 \div 300$
50	$-20 \div 25$	5500	$550 \div 300$
65	$10 \div 62$	3100	$425 \div 200$

В [36] представлен осцилляторный датчик с частотным выходом для криогенных температур. Датчик, рассматриваемый в данной работе, представляет собой кремниевый кристалл с размерами менее миллиметра и двумя электрическими контактами, последовательно включенный с сопротивлением нагрузки. Он демонстрирует наибольшую чувствительность при температуре жидкого азота $T = -196$ °С при постоянном напряжении питания $U^* = 3.1$ В, либо в виде прямоугольных импульсов длительностью 100 мкс, одиночных или повторяющихся с частотой 50 Гц. Выходной сигнал датчика представляет собой колебания напряжения на измерительном сопротивлении нагрузки. Чувствительность датчика может достигать 2 МГц/Тл, характеристики датчика изображены на рисунке 6.

В статье также отмечается, что для обеспечения независимости показаний датчика магнитного поля от такого внешнего фактора, как температура возможна температурная компенсация несколькими способами:

- а) вручную (с помощью заранее проградуированного подстроечного резистора в цепи осциллятора);
- б) термостатированием;
- в) при сопряжении с компьютером – программными средствами с использованием заранее установленной температурной зависимости показаний датчика магнитной индукции.

Как и в случае прибора, описанного в [35], использование датчика наиболее эффективно лишь при достаточно низких температурах (около -196 °С). Несмотря на линейность зависимости амплитуды колебаний от величины магнитного поля, зависимость частоты колебаний от индукции магнитного поля имеет нелинейный вид в измеряемом диапазоне величины магнитного поля.

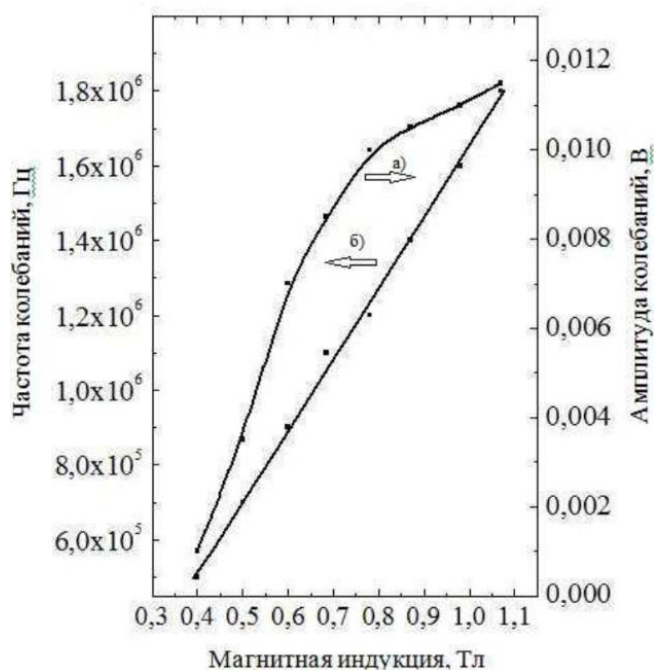


Рисунок 6 – Основные характеристики датчика магнитного поля для криогенных температур: а) зависимость амплитуды колебаний от значения магнитной индукции; б) зависимость частоты колебаний от значения магнитной индукции

В [37] описывается возможность использования осциллисторных образцов n-Ge для разработки датчиков с частотным выходом неэлектрических величин. Осциллисторы были изготовлены из n-Ge с удельным сопротивлением 0.3-0.5 Ом/см. Образцы представляют собой параллелепипеды 5-8 мм длиной с сечением 0.8-1.2 мм. Размер варьировался в зависимости от цели изучения. Электронно-дырочная плазма, необходимая для возникновения осциллисторного эффекта, генерировалась двумя путями: инжекцией носителей из омических и инжекционных контактов, а также с помощью оптической генерации носителей заряда в объеме полупроводника. Индукция магнитного поля в магнитной системе осциллистора составляет 0.3-0.4 Тл. На рисунке 7 представлены схемы на базе осциллисторных Ge образцов для преобразования внешних воздействий в изменение частоты электрических импульсов. В случае включения сопротивления нагрузки

амплитуда сигнала достигала десятков милливольт, а использование одного или двух противоположащих боковых инжектирующих контактов позволяло повысить амплитуду до нескольких вольт.

На рисунке 8 представлены зависимости частоты датчика от воздействующей на него температуры при постоянном магнитном поле 0.3-0.4 Тл для двух различных напряжений питания осциллистора. Эксперимент проводился в интервале температур от 4.2 К до 300 К. Чувствительность датчика составляет 25 кГц/К в температурном диапазоне 10-40 К, 60-70 кГц/К в диапазоне 4.5-10 К и 1-1.5 кГц/К в диапазоне 210-300 К.

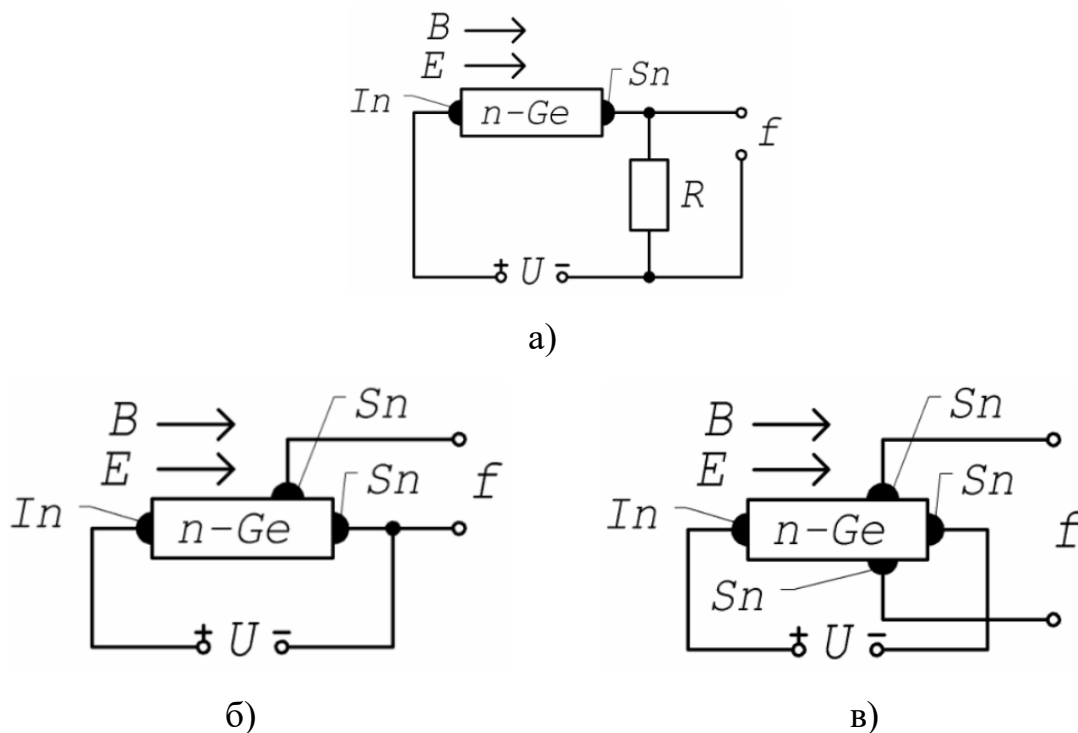


Рисунок 7 – Схемы преобразователей внешнего воздействия в изменение частоты выходного сигнала, использующие осциллисторные Ge образцы: а) схема с омическим сопротивлением; б) схема с одним боковым контактом; в) схема с двумя боковыми контактами

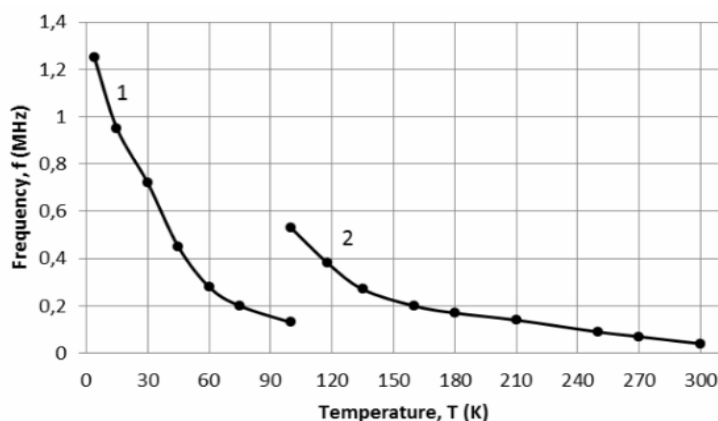


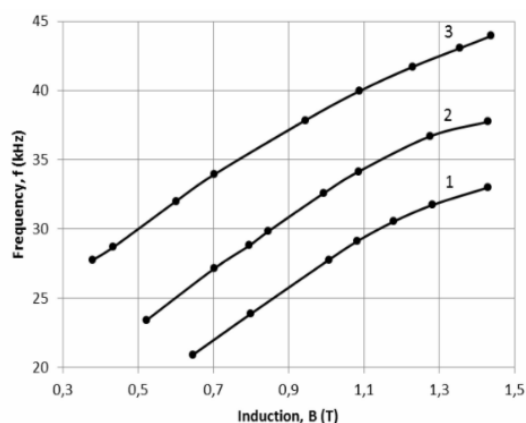
Рисунок 8 – Температурно-частотные характеристики преобразователя, использующего осцилляторный Ge образец. 1) $U=10$ В; 2) $U=40$ В

На рисунке 9 представлены зависимости выходной частоты преобразователя от величины магнитного поля, воздействующей на Ge осциллятор, при различных температурах: 4.2 К, 77 К, 295 К. Как показано на рисунках 9а и 9 б снижение температуры от 295 К до 77 К приводит к увеличению чувствительности датчика от 18 кГц/Тл до 1 МГц/Тл. Авторы отмечают, что при достижении температуры жидкого гелия – 4.2 К - чувствительность датчика достигает 1.2 МГц/Тл.

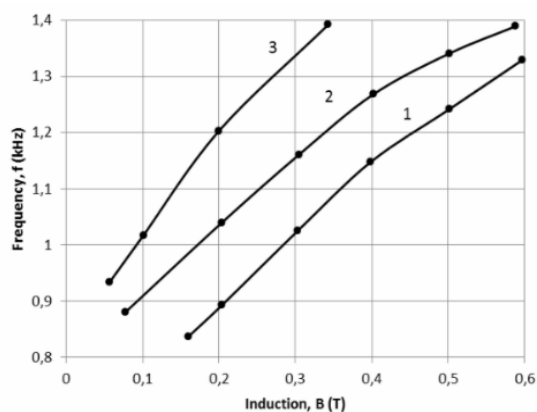
Из рисунка 9 видно, что увеличение питающего напряжения приводит к уменьшению нижнего порога чувствительности, кроме того уменьшение рабочих температур также приводит к уменьшению нижнего порога чувствительности. Авторы приводят нижнюю пороговую чувствительность для комнатной температуры 0.3 - 0.35 Тл, при 77 К составляет 0.08 - 0.1 Тл, а при температуре жидкого гелия 0.03 Тл. В [37] также приводятся данные, относящиеся к датчику силы с использованием германиевого осциллятора. Чувствительность датчика составляет 0.9 - 1.1 кГц/Н при температуре 295 К, а при температуре жидкого азота составляет 15 кГц/Н, отмечается повышение чувствительности датчика при увеличении напряжения питания.

В статье [38] эти же авторы на основе германиевого осциллятора предлагают варианты схем датчиков смещения, работающих в импульсном

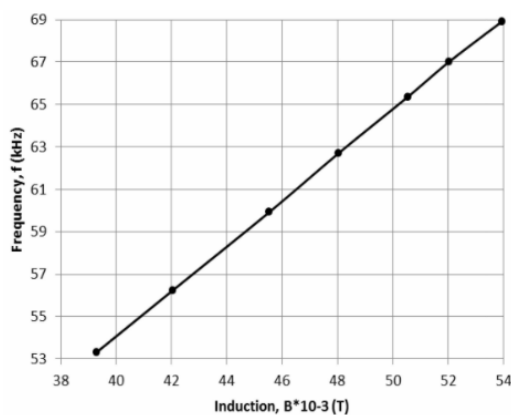
режиме для исключения перегрева. Измерения проводились при комнатных температурах 290-310 К и при температуре жидкого азота 77 К. Чувствительность датчика линейного смещения была получена 2-2.5 кГц/мм в диапазоне смещений 0-6 мм. Чувствительность датчика углового смещения была получена 1 кГц/° в диапазоне 0-10°. В статье отмечено, что чувствительность можно усилить в десяток и более раз при уменьшении рабочей температуры датчика до температуры жидкого азота.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Зависимости выходной частоты преобразователя на основе Ge осциллистора от величины магнитного поля для различных режимов питания осциллистора при различных температурах. а) $T = 295$ К; 1) $U = 20$ В; 2) $U = 30$ В; 3) $U = 40$ В; б) $T = 77$ К; 1) $U = 20$ В; 2) $U = 25$ В; 3) $U = 35$ В; в) $T = 4.2$ К

Из представленных в [37,38] результатов видно, что использование германиевых осциллиторов в качестве чувствительных элементов датчиков с частотным выходом имеет те же принципиальные недостатки, которые наблюдаются при использовании кремниевых осциллиторных чувствительных элементов.

Таким образом, датчики с частотным выходом на основе осциллиторов могут обладать высокой чувствительностью, однако режимы высокой чувствительности достигаются при высоких напряжениях питания осциллиторов, либо низких рабочих температурах. Кроме того, при измерениях возникают погрешности, связанные с флуктуациями температур. Существенным недостатком является и то, что осциллиторный режим достигается только при воздействии на чувствительный элемент продольного магнитного поля, что обуславливает необходимость использования в конструкции датчиков специальных магнитных систем. Вышеперечисленные недостатки ограничивают широкое применение датчиков с частотным выходом на основе осциллиторов.

1.5 Датчики с частотным выходом на основе автогенераторных схем

В [39] рассмотрены примеры датчиков внешнего воздействия с частотным выходом на основе различных схем автогенераторов. Частота электрических импульсов на выходе автогенераторных схем изменяется пропорционально интенсивности внешнего воздействия на часть элементов схемы. В основе функционирования описанных датчиков с частотным выходом лежат эффекты изменения электрофизических параметров, входящих в состав схемы биполярных, полевых транзисторов и других элементов под воздействием температуры, магнитного поля, оптического излучения и давления.

На рисунке 10 приведена схема ДЧВ температуры, а на рисунке 11 представлены зависимости изменения частоты от изменения температуры. Воздействие оказывается на область, обозначенную пунктиром (рисунок 10). Изменение температуры приводит к изменению электрофизических характеристик транзисторов VT1, VT2 и VT3, что влечет за собой изменение выходной частоты автогенератора.

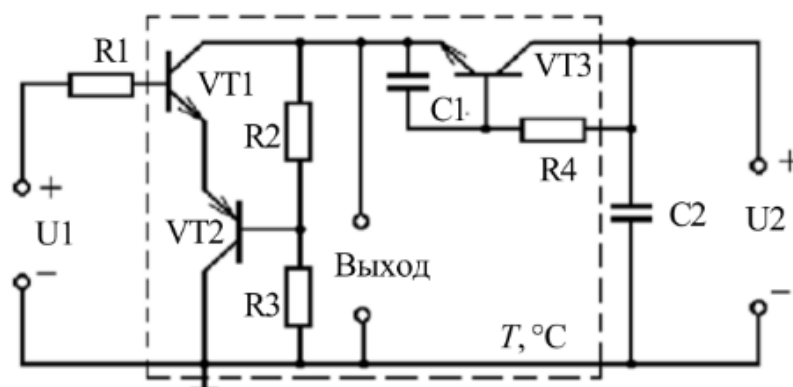


Рисунок 10 – Схема автогенераторного датчика температуры с частотным выходом. Пунктиром обозначена область воздействия температуры



Рисунок 11 – Теоретические и экспериментальные зависимости выходной частоты автогенераторного датчика с частотным выходом от температуры

Чувствительность полученного датчика составляет 3-9 кГц/°С при частотах 600-1100 кГц. На рисунках 12 и 13 представлены схема преобразователя магнитной индукции в частоту с использованием магниторезистора и зависимость изменения частоты датчика от амплитуды воздействующего на магниторезистор магнитного поля, соответственно. Чувствительность такого датчика достигает 1 кГц/мТл. Авторы статьи отмечают, что при использовании вместо магнитосопротивления полевого транзистора VT2 в качестве чувствительного элемента параметры схемы улучшаются, повышается линейность преобразования при повышении напряжения питания, а теоретическая чувствительность достигает 3 кГц/мТл.

Теоретическое и экспериментальное исследование схемы датчика магнитного поля с частотным выходом в интегральном исполнении, в котором емкостный и индуктивный элементы колебательного контура изготовлены на основе биполярных магниточувствительных транзисторов, показали, что его чувствительность может достигать величины 6 кГц/мТл на частоте 1350 кГц.

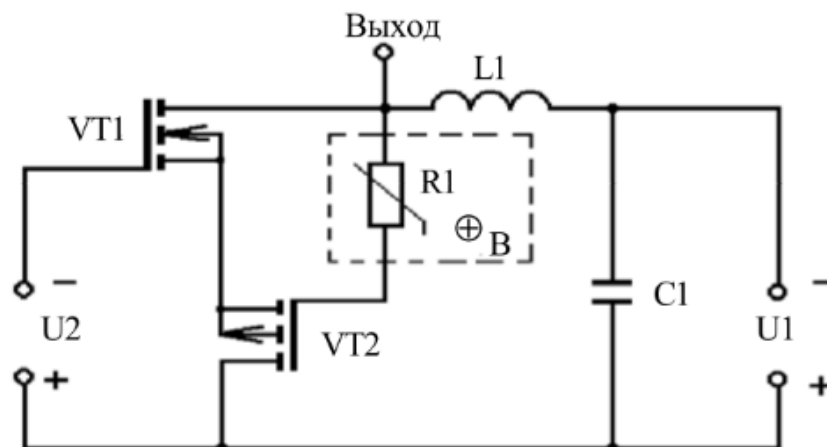


Рисунок 12 – Схема автогенераторного датчика магнитного поля с частотным выходом, использующего магниторезистор в качестве чувствительного элемента. Пунктиром обозначена область воздействия магнитного поля

Авторы [39] также приводят схемы датчиков оптического излучения с частотным выходом (рисунок 14) и различные варианты схем преобразования давления в частоту. Фоточувствительный датчик сконструирован на основе арсенидгаллиевого полевого транзистора с барьером Шоттки и биполярного транзистора. Функционирование основано на эффекте взаимодействия оптического излучения с базой биполярного транзистора и каналом полевого транзистора. Наилучшая чувствительность достигается при длине волны 0.7 мкм и составляет при мощностях излучения свыше 10 мкВт/см² 25 кГц/мкВт/см². Для измерителей давления авторы отмечают оптимальной конструкцию, указанную на рисунке 15, обеспечивающую линейность преобразования и чувствительность 12.5 кГц/кг·с/мм². В датчике используются тензочувствительные полевые транзисторы VT1, VT2, VT3.

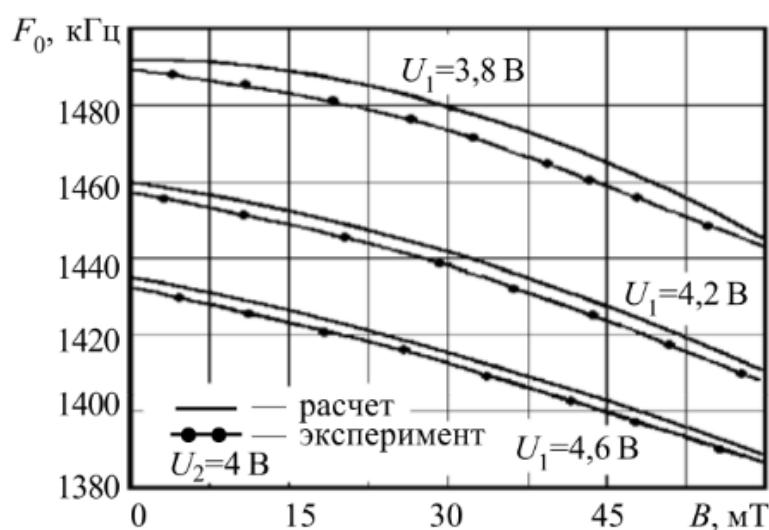


Рисунок 13 – Теоретические и экспериментальные зависимости частоты генерации автогенераторного датчика частотным выходом от величины магнитной индукции

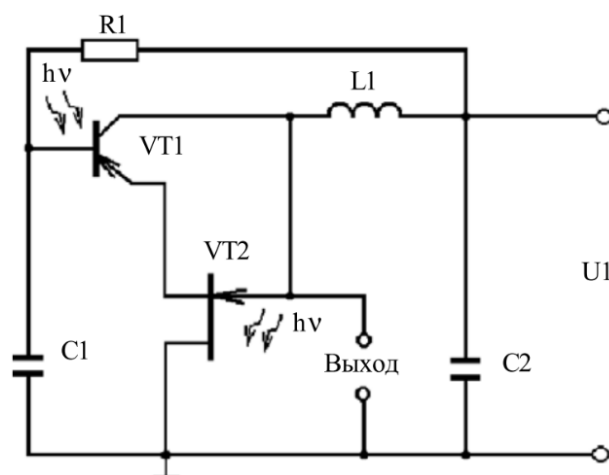


Рисунок 14 – Схема автогенераторного датчика оптического излучения с частотным выходом

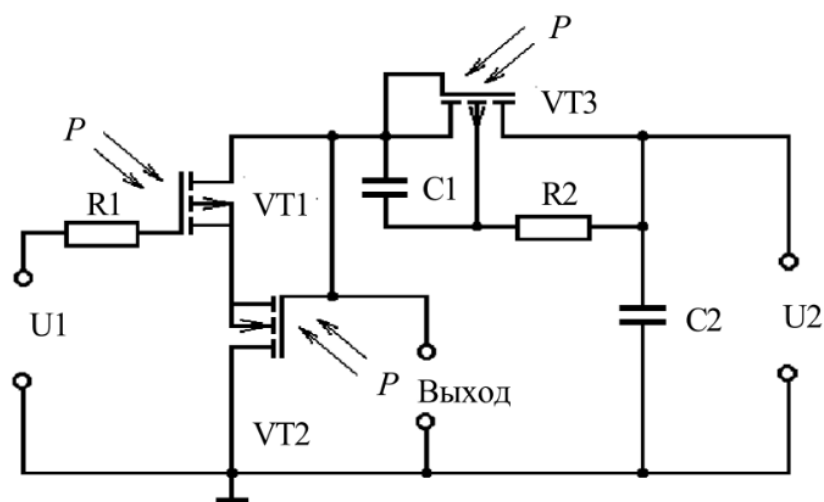


Рисунок 15 – Схема автогенераторного датчика давления с частотным выходом

Рассмотренные датчики внешних воздействий на основе автогенераторных схем характеризуются простотой конструкций, обладают хорошей воспроизводимостью результатов, высокой чувствительностью, возможностью реализации схем в интегральном исполнении. В отличие от датчиков на основе осциллисторов они не требуют встроенной магнитной системы, обеспечивающей возникновение колебаний. Поскольку такой метод имеет очевидные достоинства, то в настоящей работе исследуется его

применение для создания датчиков с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента типа ПДХ.

1.6 Датчики с частотным выходом на основе схем транзисторных аналогов негатронов

Большого внимания заслуживают датчики, использующие схемы транзисторных аналогов негатронов. Перспективы этого направления изложены в [40]. Транзисторные аналоги негатронов не требуют применения внешних элементов в цепи положительной обратной связи, эти связи являются внутренними [41]. Кроме того, генераторы, реализованные на аналогах негатронов, требуют минимального использования реактивных элементов (конденсаторов, катушек), что делает удобным их применение в микроэлектронике. В качестве чувствительных элементов в схемах датчиков на аналогах негатронов может быть использованы различные чувствительные элементы от терморезисторов до элементов Холла, включенные непосредственно в схему генератора и определяющие его выходную частоту в зависимости от амплитуды прилагаемого внешнего воздействия. В [41,42] приведены конструкции датчиков различных воздействий с частотным выходом на основе схем аналогов негатронов с использованием различных чувствительных элементов – пьезорезисторов, ГМР-элементов, элементов Холла и др. На рисунке 16а показана схема аналога негатрона с резистивным мостом. Авторы предлагают вместо резисторов R3, R4, R5 и R6 использовать кремниевый крестообразный сенсор влажности, паров аммиака, дыма (рисунок 16б). Сенсор образован на кремниевой подложке р-типа и содержит эпитаксиальную пленку с областями р- и п-типа, а также поликремниевую пленку, изолированную от подложки пленкой двуокиси кремния. Область эпитаксиальной пленки р-типа смыкается с подложкой р-типа. Кратковременное (в течение 5с) воздействие на сенсор влажного воздуха приводило к увеличению частоты от

39 до 41 кГц. Воздействие паров дыма или аммиака увеличивало частоту до 43 кГц, а света от лампочки 25 Вт – до 45 кГц. Время реакции составляет единицы секунд, а время восстановления начальной частоты после прекращения воздействия 0.5 – 1 мин.

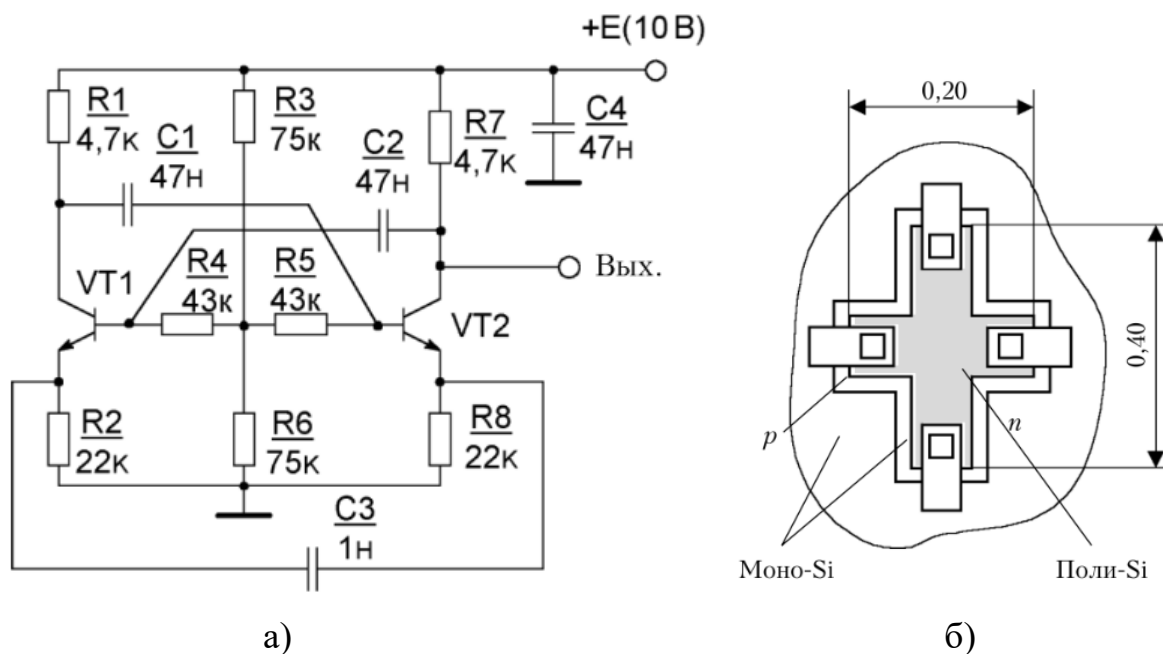


Рисунок 16 – Схема аналога негатрона (а) для конструирования датчика влажности, паров аммиака и дыма с использованием кремниевого крестообразного сенсора (б) вместо резисторов R3, R4, R5 и R6

По такому же принципу в схеме на рисунке 17а используется ГМР-элемент (рисунок 17б), чувствительный к магнитному полю. Если к ГМР-элементу, включенному вместо резисторов R2 и R3 поднести постоянный магнит с индукцией $B = 0.4$ Тл, то генерируемая на выходе частота изменится с 243.46 до 277.73 кГц. Изменение направления индукции магнитного поля вело к уменьшению генерируемой частоты примерно в той же пропорции.

Авторы отмечают, что подобные схемы могут быть использованы как с известными резистивными сенсорами, так и с оригинальными кремниевыми. Далее приводятся примеры конструкции датчиков температурного воздействия и датчиков магнитного поля.

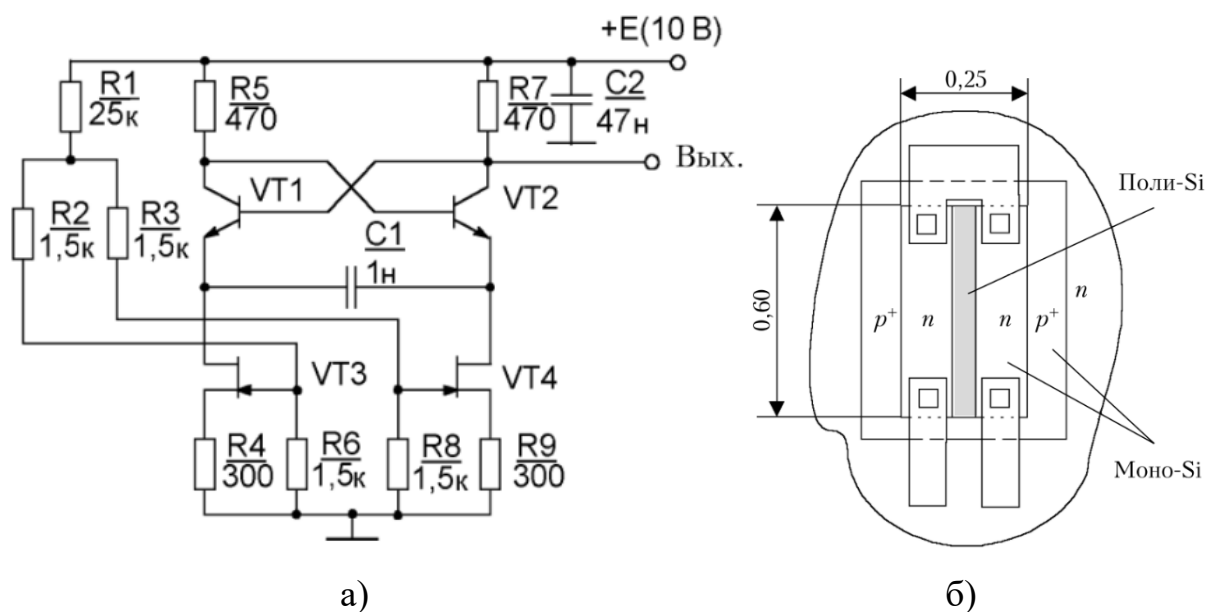
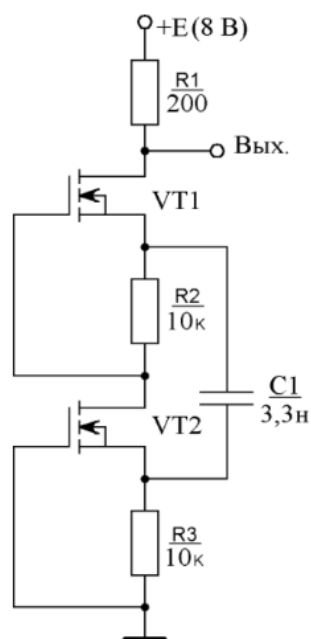


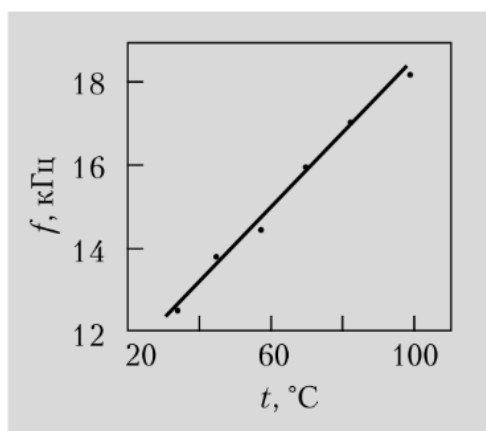
Рисунок 17 – Схема аналога негатрона для конструирования датчика магнитного поля с использованием ГМР-элемента (б) вместо резисторов R2 и R3

На рисунке 18 показана схема датчика температуры с частотным выходом, термочувствительными элементами которой являются транзисторы самого аналога негатрона. В статье отмечено, что, хотя чувствительность составляет $0.66 \text{ кГц/}^{\circ}\text{C}$ (это по сравнению со схемой, в которой в качестве сенсоров используются транзисторы в диодном включении [42] меньше примерно в 5 раз), зависимость частоты генерации от температуры линейна, а схема просто реализуется в интегральном исполнении.

В [41] приводятся схемы датчиков, преобразующих магнитное поле в частоту, с использованием кремневого элемента Холла. Одна из таких схем и график зависимости частоты от амплитуды магнитного поля приведены на рисунке 19. Данная схема отмечена авторами как схема с самой высокой чувствительностью из тех, которые авторами изучались.



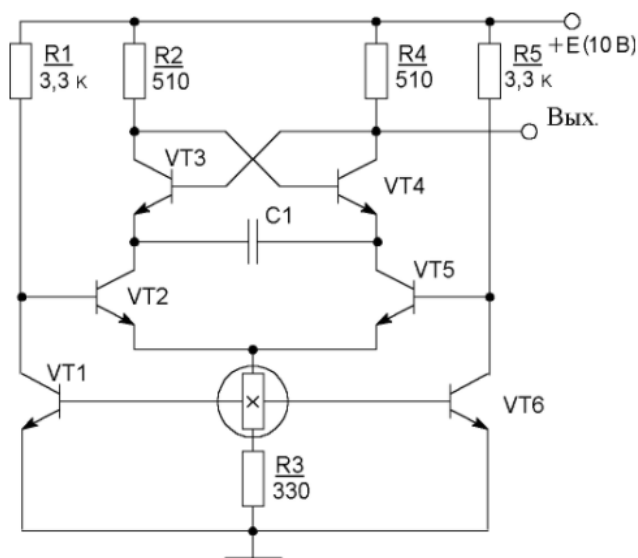
а)



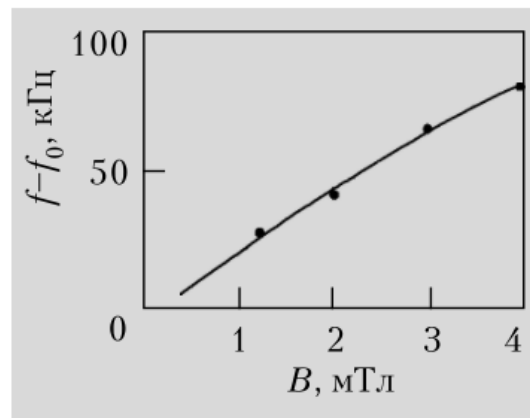
б)

Рисунок 18 – Схема преобразователя температуры в частоту (а) и график зависимости частоты генерации от температуры (б)

Таким образом, датчики с частотным на основе схем аналогов негатронов обладают хорошей воспроизводимостью результатов, высокой чувствительностью и простотой исполнения. Исполнение преобразователей на основе данных схем позволяет минимизировать использование реактивных элементов (конденсаторов и катушек), что делает удобным их применение в микроэлектронике.



а)



б)

Рисунок 19 – Схема датчика магнитного поля с частотным выходом с использованием кремниевого элемента Холла (а) и график зависимости изменения частоты генерации от амплитуды воздействующего магнитного поля (б)

Несмотря на очевидные достоинства описанных датчиков внешних воздействий с частотным выходом на основе схем аналогов негатронов в то же время можно отметить, что для изменения основной частоты генерации электрических импульсов на выходе необходимо изменять номиналы компонентов, входящих в состав схемы.

Для всех рассмотренных методов создания ДЧВ общим является необходимость применять различные по природе чувствительные элементы (пьезорезисторы для контроля давления, терморезисторы для контроля температуры, элементы Холла для контроля магнитного поля и т.д.) для регистрации воздействий различного типа. В настоящей работе предложен универсальный КНИ чувствительный элемент с двухзатворной МДПДМ полевой управляющей системой (типа ПДХ), конструкция которого обеспечивает возможность управления параметрами ДЧВ, а также создания

высокочувствительного многофункционального датчика с частотным выходом.

Глава 2. Объекты исследования и методика проведения экспериментов

В главе описывается полевой датчик Холла, его конструктивные особенности, способы изготовления, приведены методика измерения основных параметров и измерительные приборы, для этого используемые. Кроме того, приводятся разработанные схемы датчиков с частотным выходом, использующие ПДХ в качестве чувствительного элемента, методика измерения их выходных частотных характеристик и измерительные приборы для этого используемые.

2.1 Полевой датчик Холла. Конструктивные особенности и методика изготовления

ПДХ представляет собой двухзатворный кремниевый МОП транзистор с дополнительными измерительными контактами на боковых противоположных сторонах рабочего слоя Si. ПДХ подробно описан в работах [16,17,18].

Структуры КНИ, использованные при изготовлении ПДХ, созданы методом имплантации ионов кислорода по технологии SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen) [17,20,43]. Рабочий приборный слой имеет размеры $500 \times 500 \times 0.2$ мкм. Он создан в слое кремния КНИ структуры n-типа с концентрацией электронов $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщиной 0.2 мкм. Токовые и холловские контакты размером 50×50 мкм были получены легированием фосфора до уровня 10^{20} см^{-3} . Далее на поверхности рабочего слоя кремния был выращен термический окисел толщиной 0.35 мкм, поверх которого осаждена пленка Al. Таким образом, ПДХ имеет систему двух управляющих затворов, с помощью которых осуществляется управление электрофизическими параметрами прибора. Кроме того, наличие двух затворов позволяют создавать оригинальные схемы обработки

индуцированного внешним воздействием выходного сигнала [18]. Конструкция ПДХ и с соотношением $W/L=1$ схематично представлена на рисунке 20.

Рабочим режимом ПДХ является режим аккумуляции электронов у границ разделов Si-SiO₂ и частичного обеднения Si канала между аккумулярованными областями пленки Si. Пояснение режима работы приведено в главе 1 на рисунке 2. Фотография внешнего вида ПДХ в металлокерамическом корпусе приведена на рисунке 21.

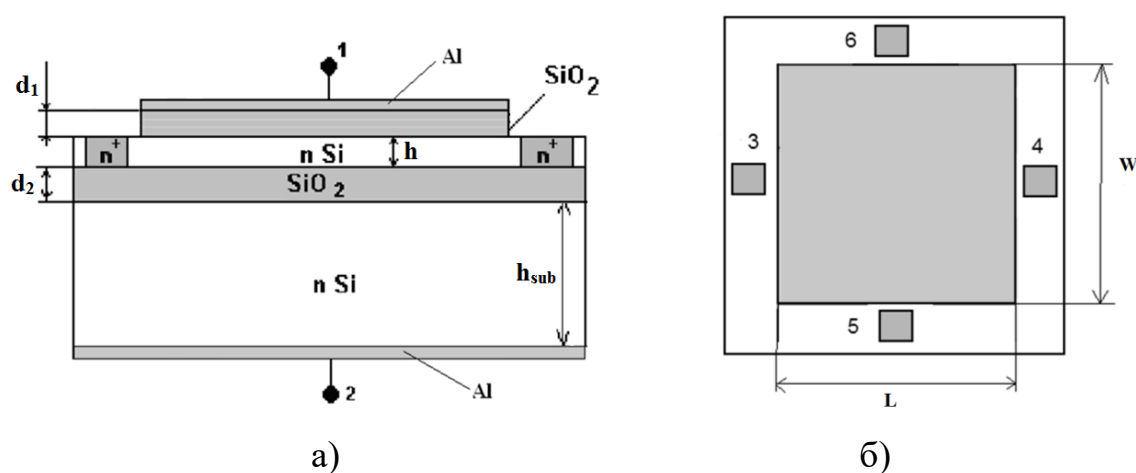


Рисунок 20 – Размеры и расположение элементов КНИ ПДХ; 1, 2 - контакты верхнего и нижнего затворов, 3,4 - токовые (омические) контакты, 5,6 – боковые измерительные контакты. Параметры: $h = 0.2$ мкм - толщина рабочего слоя кремния, $d_1 = 0.35$ мкм- толщина верхнего подзатворного диэлектрика, $d_2 = 0.35$ мкм- толщина скрытого диэлектрика КНИ структуры, $h_{sub} = 400$ мкм - толщина подложки, $L = 500$ мкм - длина кремниевого канала, $W = 500$ мкм - ширина кремниевого канала; а) поперечное сечение, б) вид сверху

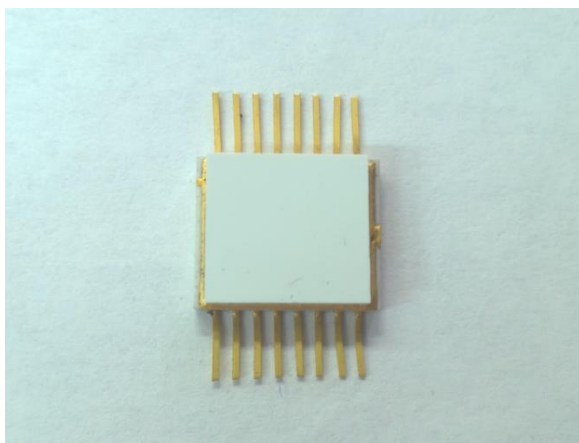


Рисунок 21 – Внешний вид ПДХ в металлокерамическом корпусе

2.2 Методика исследования характеристик ПДХ и применяемая для этого аппаратура

Для разработки управляемых датчиков с частотным выходом, использующих ПДХ в качестве чувствительного элемента, необходимо получить представления о его физических свойствах. Для этого важно зафиксировать его основные электрические и сенсорные характеристики. Поскольку ПДХ представляет собой элемент транзисторного типа с интегрированным ЭХ, необходимыми для измерения являются вольт-амперные характеристики (ВАХ), передаточные характеристики, холловские, холл-затворные характеристики. Важным также является изучение электрических параметров ПДХ в диапазоне температур, поскольку температурные зависимости позволят оценить ошибки магнитных измерений при изменении температуры, а также определить возможность и подходы к разработке датчика температуры с частотным выходом, использующего ПДХ.

Для измерений электрических характеристик применялись стабилизированные малощумящие источники питания GPS-2303, PSP-603, 13PP-30-50-010, TEC-1300K. Для измерений применялись высокоточные мультиметры GDM-8246, APPA-207, APPA-303, DT-9207, универсальные

вольтметры В7-38, В7-21. В качестве источников магнитного поля использовались постоянные магниты с величиной индукции от 8 мТл до 120 мТл.

При измерении основных характеристик ВАХ ПДХ напряжения питания изменялось от 0 до 20 В, потенциалы на затворах варьировались в диапазоне от 0 до 20 В. При измерениях была преимущественно использована электрическая схема включения, при которой затворы ПДХ находились под одним потенциалом (рисунок 22). В разделе 3.1 будет показано, что такая схема включения имеет наибольшую эффективность с точки зрения регистрации магнитных полей.

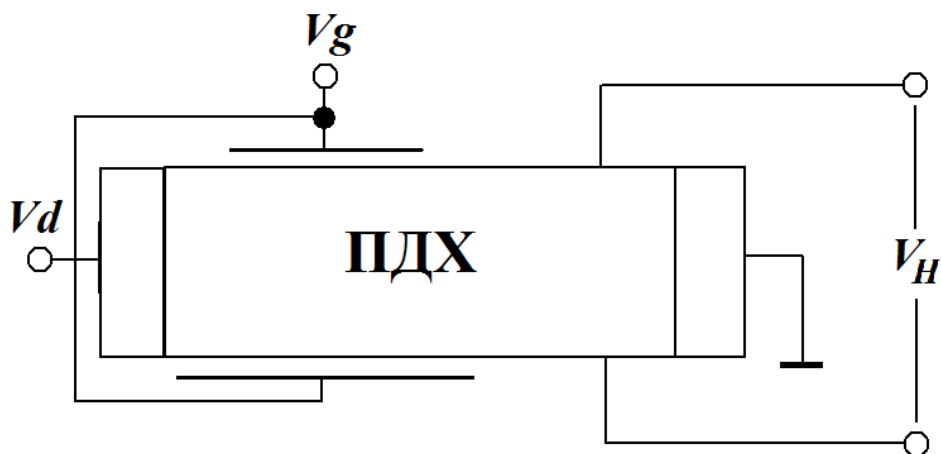


Рисунок 22 – Схема подключения контактов ПДХ

Для измерения температурных характеристик ПДХ были созданы температурные приставки способные задавать температурный диапазон от -5 °С до 150 °С с точностью 0.1 °С

Блок-схема измерительной установки, созданной для измерения основных характеристик ПДХ, приведена на рисунке 23.

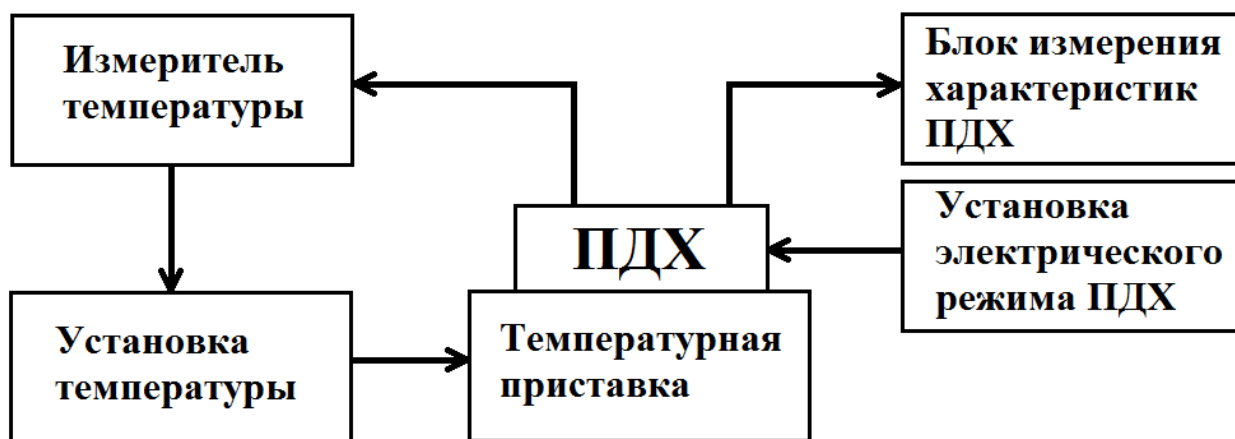


Рисунок 23 – Блок-схема установки для измерения характеристик ПДХ

2.3 Схемы исследуемых датчиков с частотным выходом

В работе изучаются три типа конструкций ДЧВ, использующих КНИ чувствительный элемент транзисторного типа на примере ПДХ.

Первый тип основан на появлении скачков тока в канале ПДХ в условиях лавинного умножения носителей. Для создания такого ДЧВ была использована схема генератора на основе КНИ транзистора, приведенная в [31], но в ней был использован КНИ ПДХ и организована дополнительная обратная связь для обеспечения отклика частоты электрического сигнала ДЧВ на появление внешнего воздействия. В работе такая схема изучается в качестве датчика магнитного поля с частотным выходом.

Второй тип конструкции основан на включении ПДХ цепь автогенераторного устройства, образованного операционным усилителем AD-620, 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. Схематически конструкция датчика изображена на рисунке 25. Ранее она была предложена в работе [44], однако подробно не исследовалась. В

данной работе изучается возможность ее использования для создания датчика магнитного поля, температуры и ионизирующей радиации с частотным выходом.

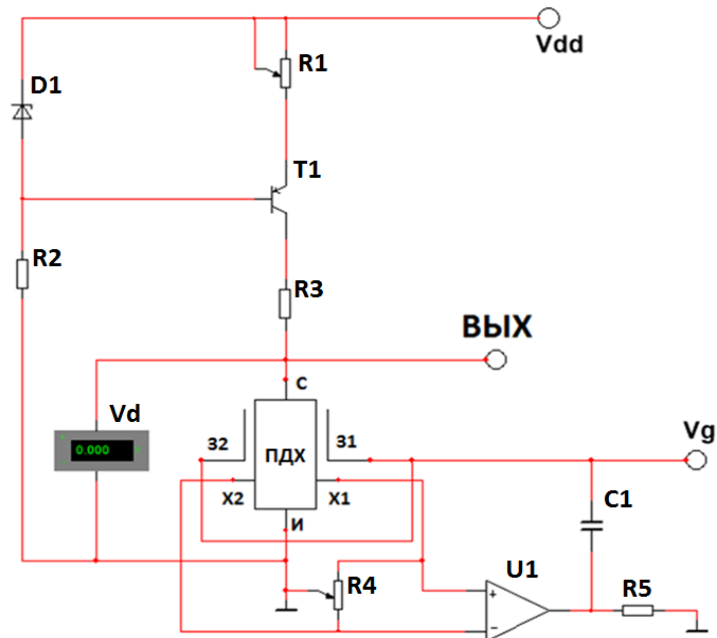


Рисунок 24 – Электрическая схема датчика с частотным выходом на основе появления скачков тока в канале ПДХ условиях лавинного умножения носителей. С, И – контакты стоки и истока ПДХ, 31,32 – контакты затворов ПДХ, X1, X2 – холловские контакты ПДХ

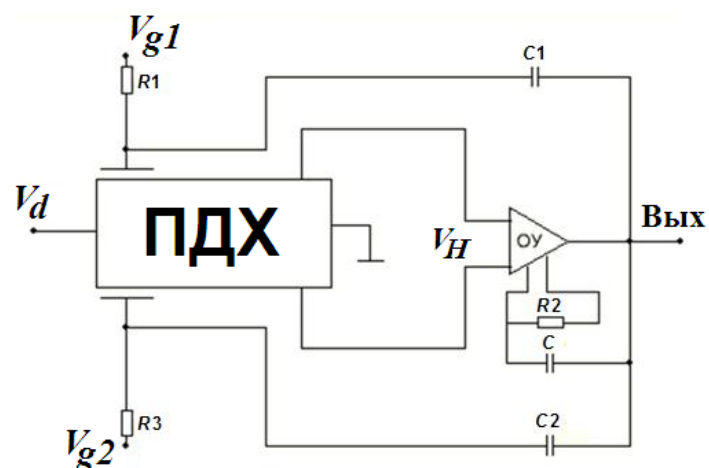


Рисунок 25 – Схема ДЧВ, основанного на включении ПДХ в автогенераторную цепь

Третий тип конструкции ДЧВ основан на приведенной в [41] схеме преобразователя магнитного поля в частоту на основе транзисторного аналога негатрона. Схема разработанного и исследуемого в данной работе преобразователя приведена на рисунке 26. По сути, такой преобразователь является бистабильным мультивибратором, формируемым транзисторами Т1-Т4 с возможностью управления частотой электрического сигнала на выходе за счет изменения внутреннего сопротивления транзисторов Т5 и Т6. В работе схема ДЧВ такого типа изучается в качестве датчика магнитного поля и температуры с частотным выходом.

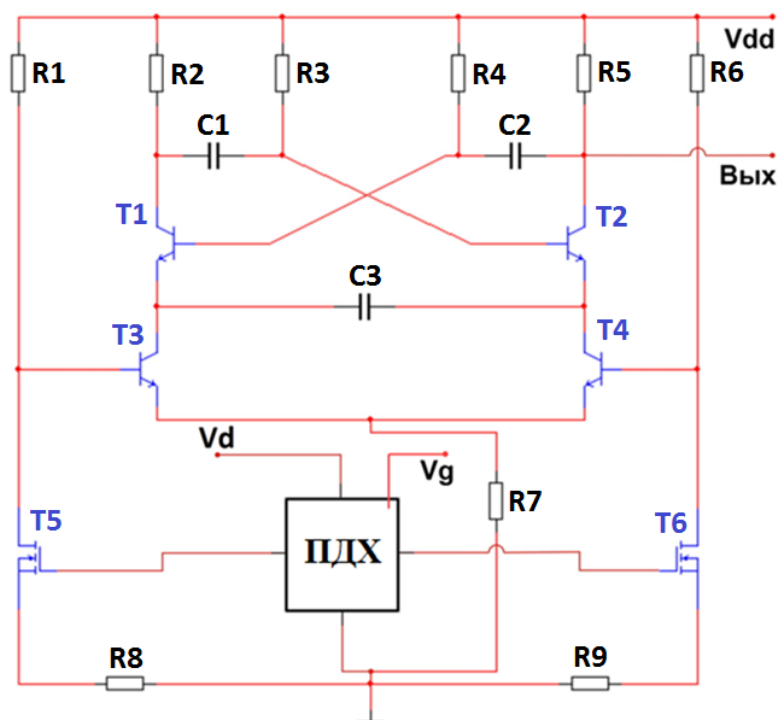


Рисунок 26 – Схема ДЧВ на основе схемы бистабильного мультивибратора с использованием ПДХ в качестве чувствительного элемента

2.4 Аппаратура, применяемая для исследования выходного сигнала ДЧВ

Основными анализируемыми параметрами выходного сигнала ДЧВ, использующих КНИ чувствительный элемент типа ПДХ, являются форма

частотного электрического сигнала, его частота, амплитуда. Для анализа данных параметров использовались высокоточные частотомеры ЧЗ-64, Aligent 53132A, осциллографы С1-64, Tectronix MDO3104.

Блок-схема для измерений характеристик выходного сигнала датчиков с частотным выходом, использующих ПДХ, изображена на рисунке 27.



Рисунок 27 – Блок-схема для измерений характеристик выходного сигнала ДЧВ, использующих ПДХ в качестве чувствительного элемента

Глава 3. Исследование полевого датчика Холла

В главе приведены результаты исследования эффекта зарядовой связи в КНИ чувствительных элементах типа ПДХ, имеющих встроенный канал и полевое МДПДМ управление.

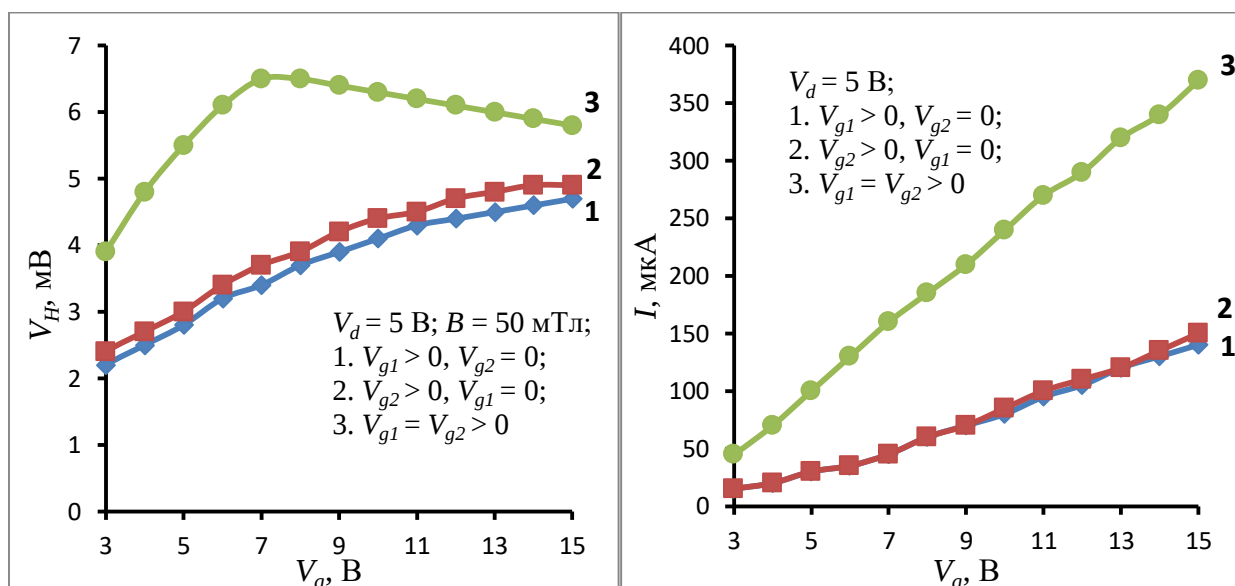
Представлены результаты исследования основных электрических характеристик ПДХ, в частности, вольт-амперных характеристик (семейство зависимостей рабочего тока I ПДХ от напряжения питания V_d при различных фиксированных потенциалах, поданных на управляющие затворы V_g) и передаточных характеристик (семейство зависимостей рабочего тока I ПДХ от потенциалов на затворах V_g при различных фиксированных напряжениях питания V_d чувствительного элемента). Для использования при разработке датчиков магнитного поля с частотным выходом получены холловские характеристики (зависимости холловского напряжения V_H от напряжения питания V_d ПДХ) а также Холл-затворные характеристики (зависимости холловского напряжения V_H от потенциалов на затворах V_g ПДХ). Характеристики ПДХ измерялись при температурах $-5 \dots 150$ °С.

Во третьем разделе главы приводится анализ предельных рабочих температур ПДХ, который показывает, что в зависимости от функционального назначения датчика предельная рабочая температура ПДХ может составлять $575 \dots 700$ °С.

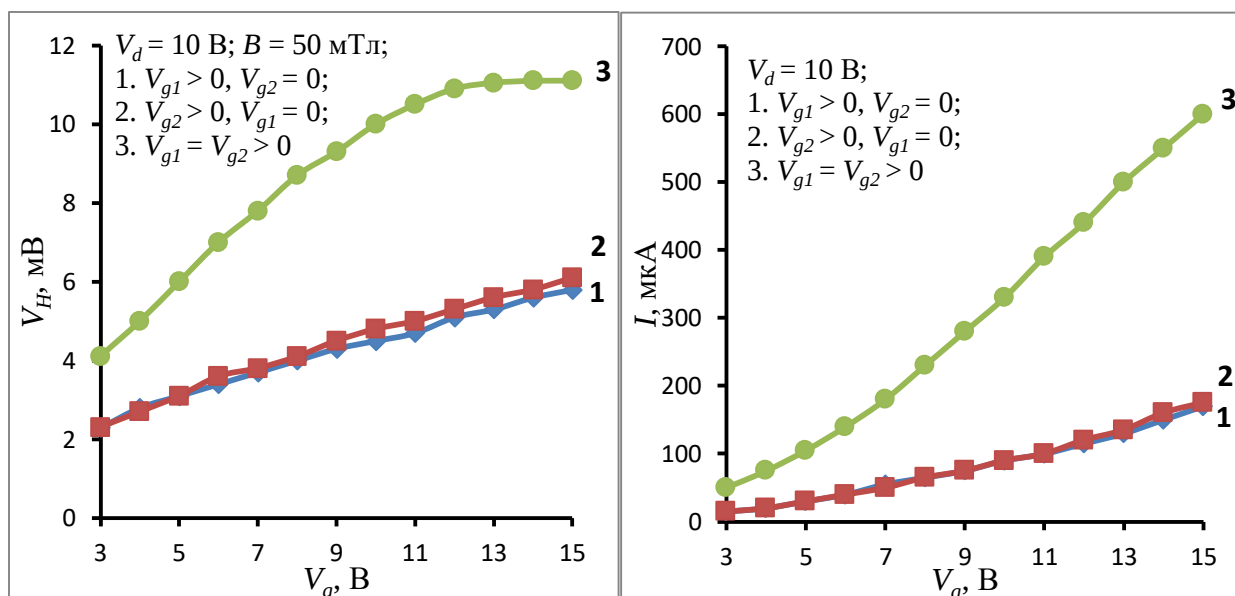
3.1 Эффект зарядовой связи в канале ПДХ

Для изучения характеристик ПДХ и датчиков с частотным выходом на его основе важно определить наиболее оптимальный с практической точки зрения электрические режимы включения ПДХ. Поскольку ПДХ имеет два симметричных управляющих полевых затвора, то такая задача сводится к исследованию влияния потенциала затворов при их сепаратном или одновременном включении и вариациях напряжения питания. Для этого

были исследованы передаточные характеристики и зависимости э.д.с. Холла от потенциала V_g (в диапазоне 3-15 В), поданного на каждый из затворов ПДХ по отдельности, либо на оба сразу при заданном напряжении питания V_d (5, 10 В). Характерные экспериментальные зависимости приведены на рисунке 28.



а)



б)

Рисунок 28 – Зависимости э.д.с. Холла и тока канала от потенциала V_g затворов при различных конфигурациях их включения и различных напряжениях питания V_d ПДХ: а) $V_d = 5$ В; б) $V_d = 10$ В

Из рисунков видно, что подача потенциала V_g на оба затвора одновременно увеличивает значение напряжения Холла V_H до двух раз относительно включения одного из затворов в исследованном диапазоне потенциала V_g . Это может быть объяснено возникновением эффекта зарядовой связи (charge coupling effect), то есть взаимодействия поперечных полей в канале ПДХ, возникающих при включении двух затворов. Такой эффект может приводить к частичному смещению профиля распределения электронов аккумулированных токопроводящих слоев вглубь Si пленки ПДХ и повышению средней подвижности электронов в них. Это вызывает рост показаний V_H . Повышение тока I более чем в два раза при включении двух затворов (рисунок 28б) также об этом свидетельствует. Видно, что этот эффект имеет максимум и последующий спад зависимости V_H (рисунок 28а), который очевидно связан с уменьшением подвижности в увеличивающемся поперечном поле.

В таблице 3 приведены экспериментальные отношения токов при включении одного (I_g) и двух затворов одновременно (I_{2g}), а также отношения э.д.с. Холла при включении одного (V_{Hg}) и двух затворов одновременно (V_{H2g}) при различных значениях потенциалов V_g , поданных на затворы ПДХ. Можно заметить, что полученные отношения токов для всех значений V_d и V_g в два раза превышают отношения значений э.д.с. Холла. Это хорошо соотносится с приведенным далее физическим представлением для ПДХ с симметричными управляющими МДП системами, как у экспериментальных образцов.

Таблица 3 – Соотношения токов канала ПДХ и напряжений Холла при различных вариантах включения затворов

V_d, B	V_g, B	I_{2g}/I_g	V_{H2g}/V_{Hg}
5	3	3,00	1,57
5	5	3,33	1,76
5	7	3,56	1,71
5	9	3,00	1,44
5	12	2,76	1,39
5	15	2,64	1,27
10	3	3,33	1,68
10	5	3,50	1,74
10	7	3,87	2,01
10	9	3,95	2,06
10	12	3,93	2,04
10	15	3,76	1,91

Пусть плотность тока в аккумулярованном токопроводящем слое при подаче потенциала V_g на один из затворов ПДХ равна

$$j_g = qn\mu_g E, \quad (1)$$

где μ_g - средняя подвижность электронов в аккумулярованном слое при включении одного затвора, E – электрическое поле, а плотность тока в аккумулярованном токопроводящем слое при подаче потенциала V_g на оба затвора ПДХ равна:

$$j_{2g} = qn\mu_{2g} E, \quad (2)$$

где μ_{2g} - средняя подвижность электронов в аккумулярованном слое при включении двух затворов, тогда соотношение сил тока при подаче равного V_g на оба затвора ПДХ одновременно (I_{2g}) и при подаче V_g на один из затворов (I_g) будет следующим:

$$\frac{I_{2g}}{I_g} = \frac{qn\mu_{2g}E2S}{qn\mu_g ES} = 2 \frac{\mu_{2g}}{\mu_g} \quad (3)$$

Коэффициент 2 связан с тем, что в нашем случае аккумулярованные области приняты идентичными, следовательно, интегральное значение площади аккумулярованной токопроводящей области при включении двух затворов можно принять в два раза большим, чем при включении одного затвора (рисунок 20а).

Выразим соотношение μ_{2g} / μ_g через соотношение значений э.д.с. Холла при подаче потенциала V_g на оба и один из затворов, соответственно, т.е. V_{H2g}/V_{Hg} . Э.д.с. Холла определяется следующим выражением:

$$V_H = R_H j B w,$$

где R_H – постоянная Холла, определяемая концентрацией основных носителей тока в полупроводнике, j – плотность тока, B – индукция магнитного поля, w – расстояние между холловскими контактами.

Используя (1) и (2) можно получить выражения для подвижностей μ_{2g} и μ_g :

$$\mu_{2g} = \frac{V_{H2g}}{R_H q n E B w}, \mu_g = \frac{V_{Hg}}{R_H q n E B w}.$$

Полученное соотношение подвижностей при подаче потенциала V_g на оба и один из затворов равно:

$$\frac{\mu_{2g}}{\mu_g} = \frac{V_{H2g}}{V_{Hg}}.$$

Подставляя полученное соотношение в (3) получим:

$$\frac{I_{2g}}{I_g} = 2 \frac{V_{H2g}}{V_{Hg}}. \quad (4)$$

Физическое представление, описывающее соотношения токов и э.д.с. Холла, совпадает с данными эксперимента и подтверждает справедливость сделанных предположений о существовании зарядовой связи в канале ПДХ, оказывающее влияние на подвижность электронов, при конфигурации включения ПДХ, подразумевающее нахождение обоих затворов при равном потенциале V_g . В работе [45] эффект зарядовой связи связывается с изменением центроида заряда в канале МОП транзистора с МДПДМ полевой управляющей системой. Однако, в исследованном случае одновременного

включения двух затворов при равном потенциале V_g центрoид заряда не изменяет свое положение, поэтому можно сделать предположение, что такой режим включения приводит не к изменению положения центрoида, а к изменению его формы.

В ПДХ наличие эффекта зарядовой связи позволяет повысить абсолютную чувствительность датчика при заданном значении V_g (зависимости абсолютной чувствительности соответствуют зависимостям, представленным на рисунке 29). При этом увеличение тока приводит к вдвое меньшему значению относительной чувствительности S_r при заданном значении V_g согласно (4). С другой стороны, значение S_r при подаче заданного значения V_g на один из затворов ПДХ достигается в случае включения двух затворов при вдвое меньшем значении V_g .

Повышение абсолютной чувствительности является неоспоримым достоинством использования МДПДМ полевой управляющей системы ПДХ, поэтому в дальнейшем преимущественно используется схема включения двух затворов с равным потенциалом V_g .

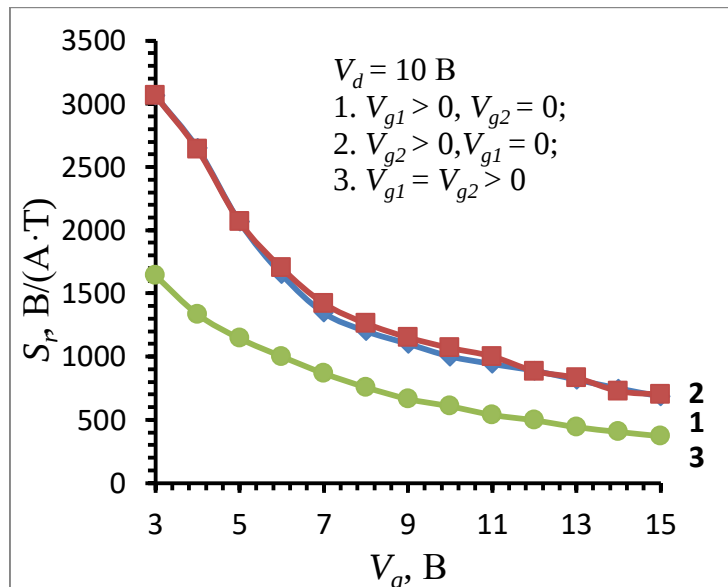


Рисунок 29 – Зависимости относительной чувствительности от потенциала затворов ПДХ различных схемах их включения. Индукция магнитного поля

$$B = 50 \text{ мТл}$$

3.2 Основные электрофизические свойства ПДХ

Поскольку полевой датчик Холла, по конструкции, является транзистором с двумя МОП затворами, то семейство его вольт-амперных характеристик имеют вид, соответствующий семейству вольт-амперных характеристик МОП транзистора со встроенным аккумулятированным каналом. При этом ПДХ также работает в режиме обогащения приборного слоя кремния вблизи границ Si-SiO₂. Характерные семейства вольт-амперных и ток-затворных характеристик ПДХ приведены на рисунках 30 и 31, соответственно.

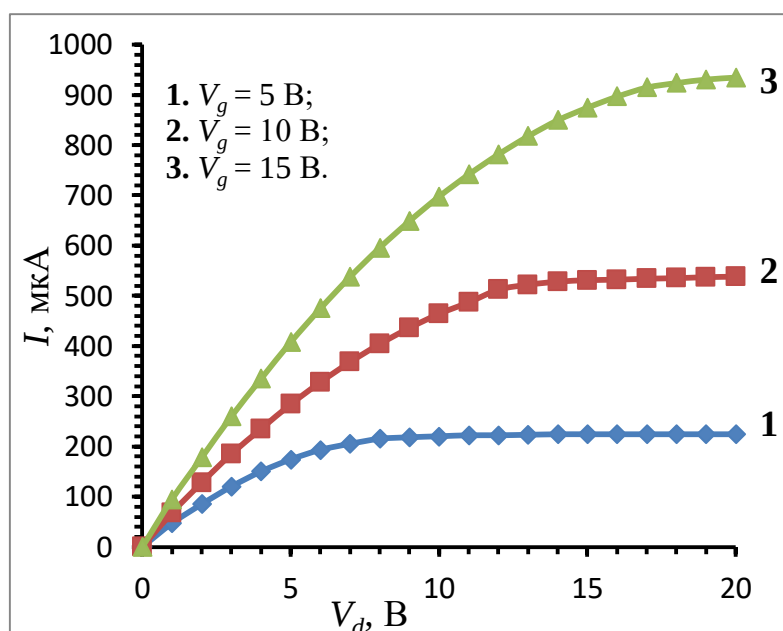


Рисунок 30 – Семейство вольт-амперных характеристик ПДХ: 1 – потенциал на затворах $V_g = 5$ В; 2 – потенциал на затворах $V_g = 10$ В; 3 – потенциал на затворах $V_g = 15$ В

ВАХ ПДХ характерно наличие омического участка и участка насыщения тока. Из ток-затворной характеристики видно, что с увеличением напряжения питания ПДХ возрастает крутизна токовой зависимости.

Переходя к характеристикам, связанным с сенсорными возможностями ПДХ, необходимо отметить, что индуцируемое магнитным полем

напряжение Холла V_H представляет собой разность между полным напряжением на холловских контактах в присутствии магнитного поля и остаточного напряжения на холловских контактах V_{H0} [46]. Остаточное напряжение Холла - разность потенциалов на холловских контактах магниточувствительного элемента в отсутствии воздействия магнитного поля [46,47]. Величина V_{H0} является важной для чувствительных к магнитному полю элементов, поскольку определяет необходимость дополнительной обработки магнитоиндуцируемого сигнала. Для ЭХ основной причиной возникновения остаточного напряжения на холловских контактах можно считать напряжения, возникающие в системе кристалл-кристаллодержатель.

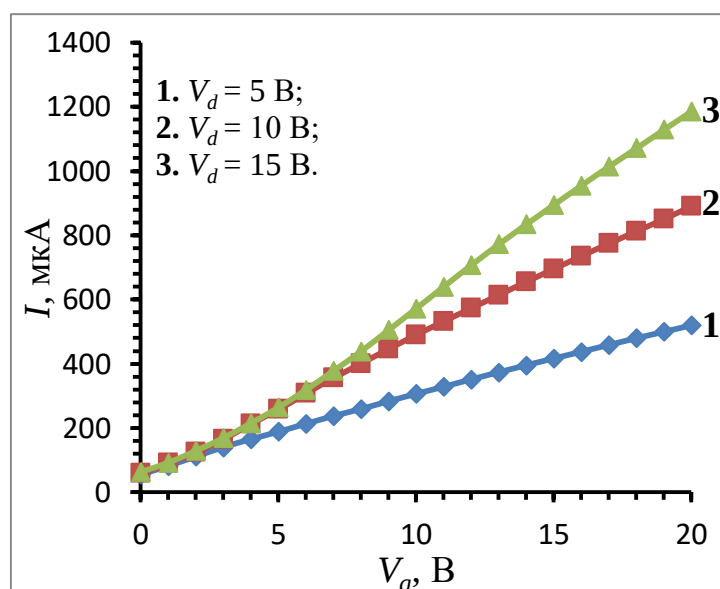


Рисунок 31 – Семейство передаточных ток-затворных характеристик для разных напряжений питания ПДХ: 1 – напряжение питания $V_d = 5$ В; 2 – напряжение питания $V_d = 10$ В; 3 – напряжение питания $V_d = 15$ В

На рисунке 32 приведены зависимости остаточного напряжения на холловских контактах ПДХ V_{H0} от напряжения питания V_d при различных потенциалах на затворах V_g , а на рисунке 33 зависимости V_{H0} от V_g при различных напряжениях V_d питания ПДХ. При напряжениях питания ПДХ V_d

до 15 В величина остаточного напряжения на холловских контактах составляет величину не более 13 мВ.

Из графика зависимостей остаточного холловского напряжения V_{Ho} от потенциалов затворов ПДХ V_g видно, что при увеличении V_g остаточное напряжение сначала растет, достигая максимума, затем уменьшается. При этом увеличение напряжения питания V_d приводит к увеличению напряжения V_g , при котором значение остаточного холловского напряжения V_{Ho} достигает максимума. Этот эффект может быть объяснен уменьшением подвижности электронов аккумулированных слоях на границах Si-SiO₂ с ростом поперечного поля при повышении потенциала на затворах.

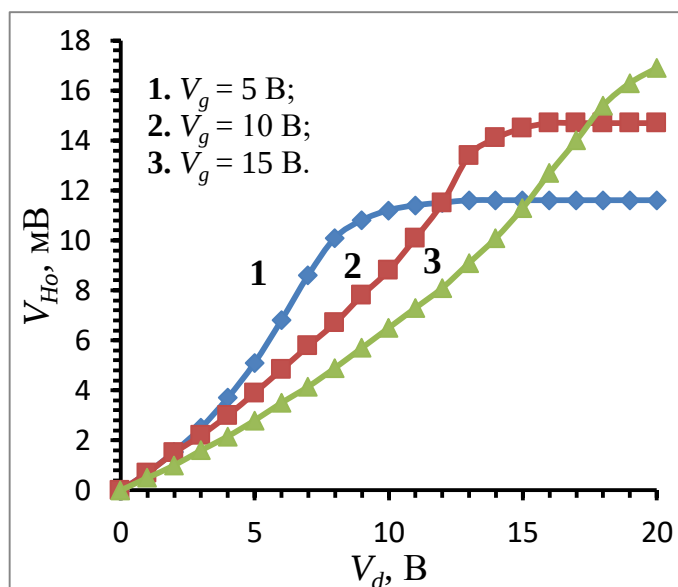


Рисунок 32 – Зависимости остаточного холловского напряжения V_{Ho} от напряжения питания ПДХ V_d при различных потенциалах, поданных на затворы: 1 – $V_g = 5$ В; 2 – $V_g = 10$ В; 3 – $V_g = 15$ В

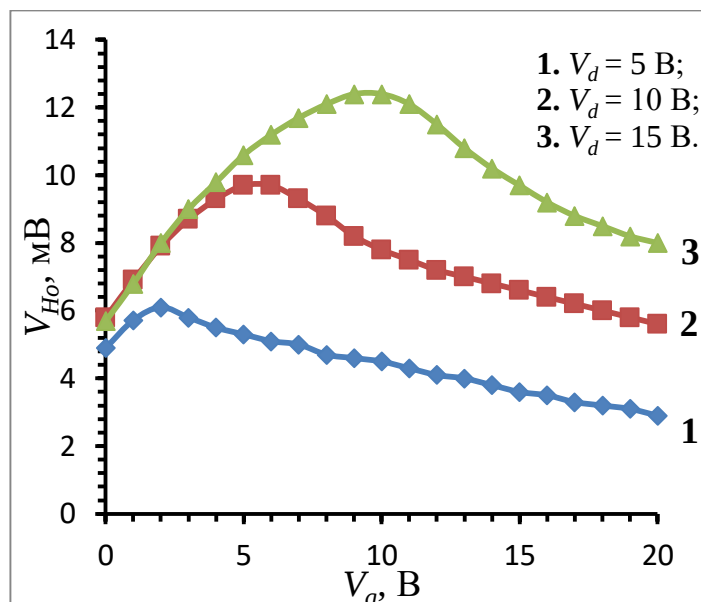


Рисунок 33 – Зависимости остаточного холловского напряжения V_{Ho} от потенциалов, поданных на затворы V_g при различных напряжениях питания ПДХ V_d : 1 – $V_d = 5$ В; 2 – $V_d = 10$ В; 3 – $V_d = 15$ В

На рисунке 34 представлены зависимости индуцированного магнитным полем напряжения Холла V_H от напряжения питания ПДХ при различных потенциалах затворов, а на рисунке 35 - от потенциала затворов ПДХ при различных напряжениях питания чувствительного элемента. Индукция магнитного поля в обоих случаях составляет величину 50 мТл.

Из представленных на рисунках 34 и 35 зависимостей видно, что полевая управляющая система из двух затворов позволяет управлять величиной напряжения Холла, индуцируемого воздействием магнитного поля. Максимальное значение магниточувствительности ПДХ в измеренных режимах достигает 0.7 мВ/мТл.

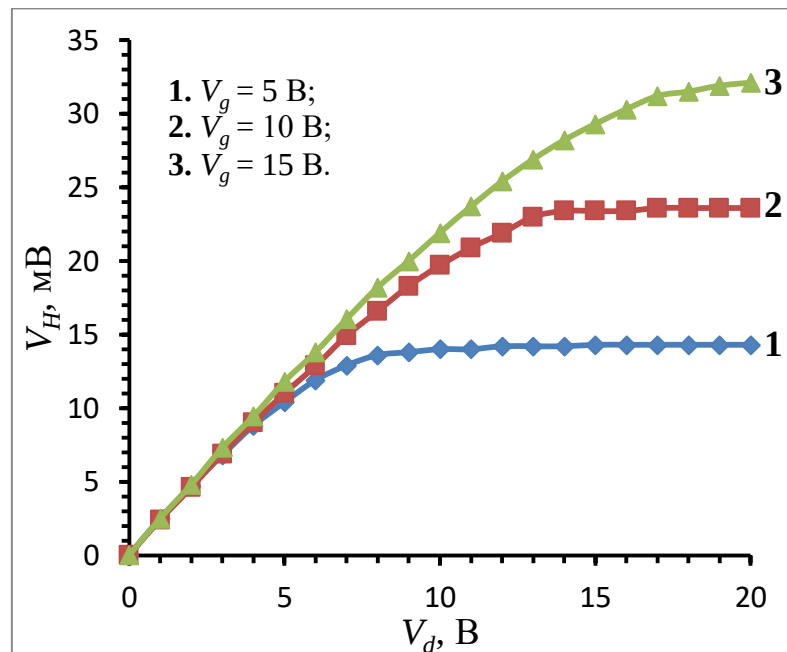


Рисунок 34 – Зависимость напряжения Холла V_H от напряжения питания ПДХ при индукции магнитного поля, равном 50 мТл: 1 – $V_g = 5$ В;
 2 – $V_g = 10$ В; 3 – $V_g = 15$ В

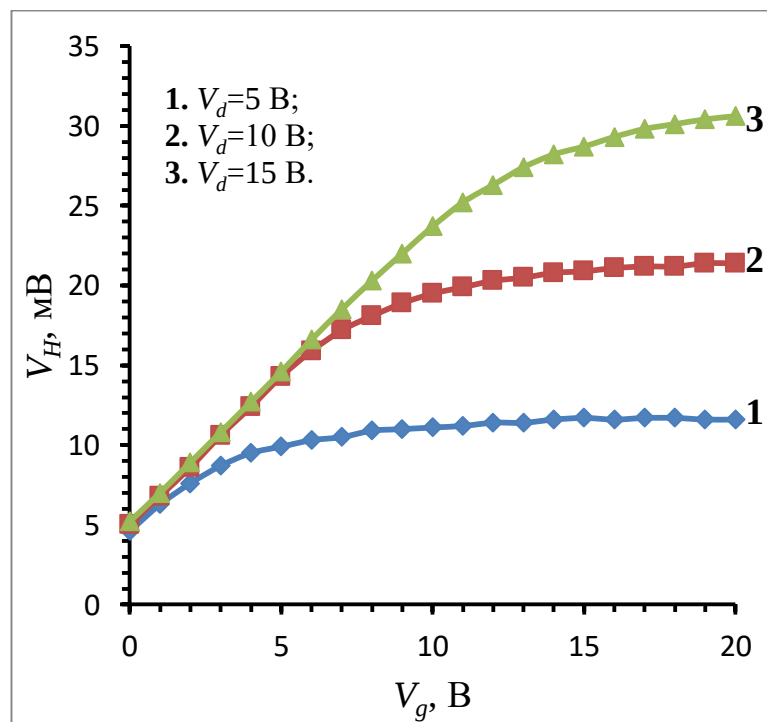


Рисунок 35 – Зависимость напряжения Холла V_H от потенциала на затворах ПДХ при индукции магнитного поля, равном 50 мТл: 1 – $V_d = 5$ В;
 2 – $V_d = 10$ В; 3 – $V_d = 15$ В

На рисунке 36 приведена характерная для ПДХ зависимость величины Холловского сигнала от величины магнитного поля. Видно, что зависимость величины Холловского сигнала изменяется линейно в заданном диапазоне индукции магнитного поля.

На рисунке 37 представлены температурные зависимости рабочего тока I ПДХ в диапазоне температур $-10 \div 150$ °С. Из приведенных графиков можно отметить линейность температурных зависимостей в заданном диапазоне температур.

Полученные температурные зависимости тока канала ПДХ, позволяют предположить, что ПДХ можно использовать и для создания датчика температуры с частотным выходом (соответствующему исследованию посвящена глава 5), а также для калибровки датчика магнитного поля с частотным выходом, подвергнутого воздействию температуры.

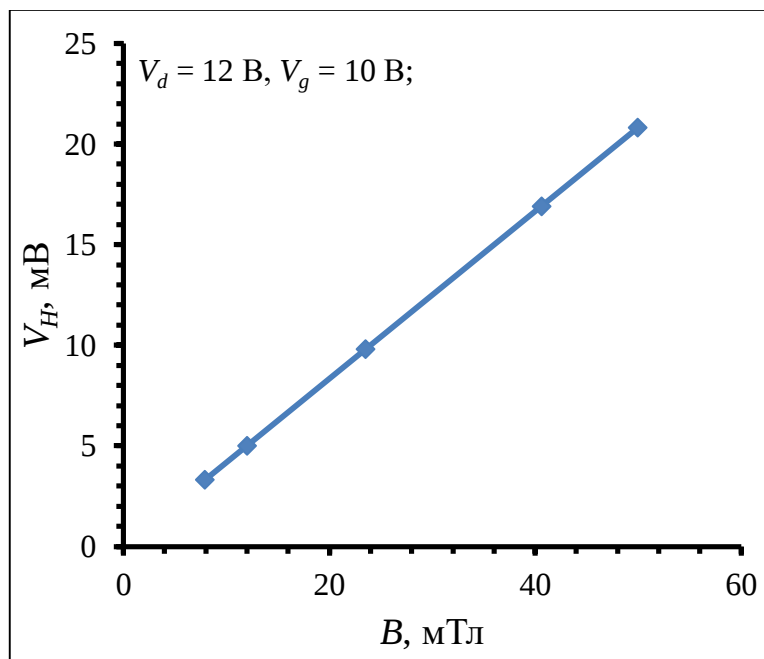


Рисунок 36 – Характерная зависимость напряжения Холла V_H от величины индукции B воздействующего на ПДХ магнитного поля при $V_d = 12$ В, $V_g = 9$ В

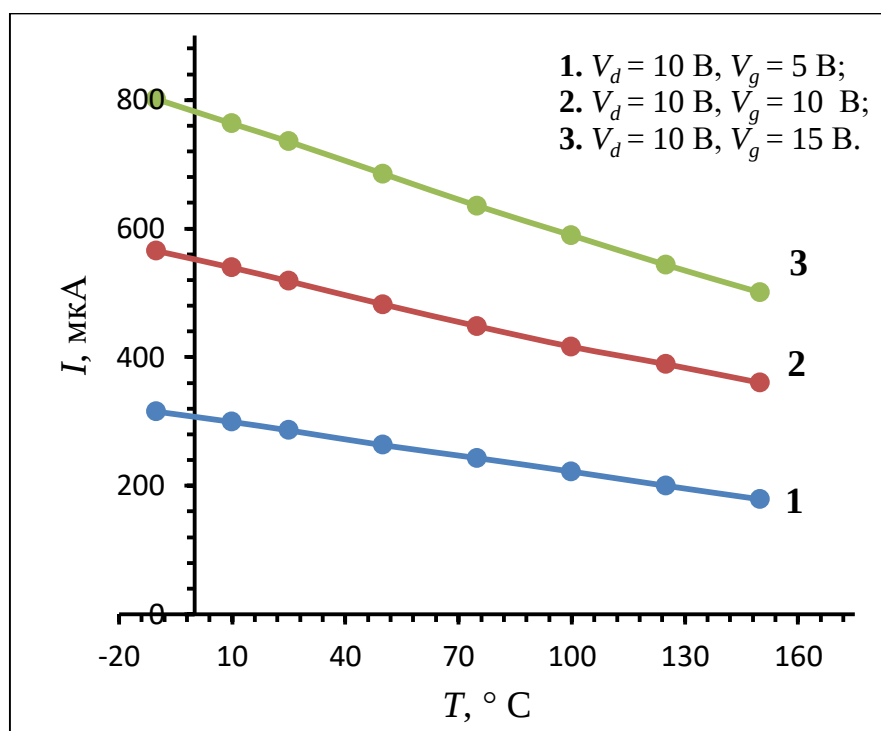


Рисунок 37 – Характерные температурные зависимости рабочего тока I ПДХ в диапазоне температур $-10 \div 150^\circ\text{C}$

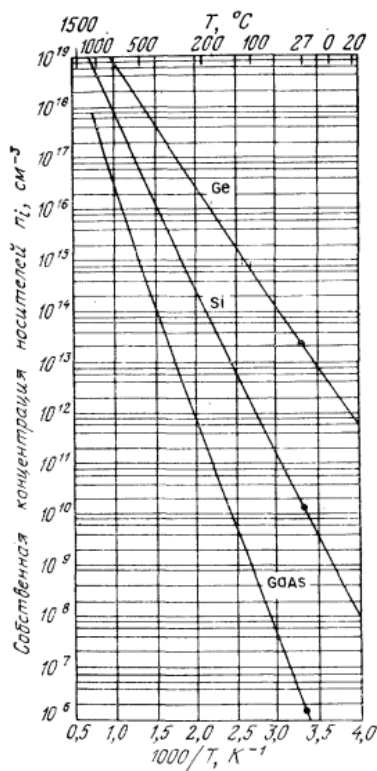
Таким образом, оригинальность конструкции ПДХ, а именно наличие двухзатворной металл-диэлектрик-полупроводник-диэлектрик-металл (МДПДМ) полевой управляющей системы, позволяет управлять рабочим током I , величиной остаточного холловского сигнала V_{Ho} и полного напряжения Холла V_H , чувствительностью, крутизной температурных зависимостей рабочего тока. Кроме того, как показано в [18] двухзатворная полевая управляющая система позволяет на базе данного элемента создавать оригинальные схемы обработки индуцированного сигнала.

3.3 Анализ предельных рабочих температур ПДХ

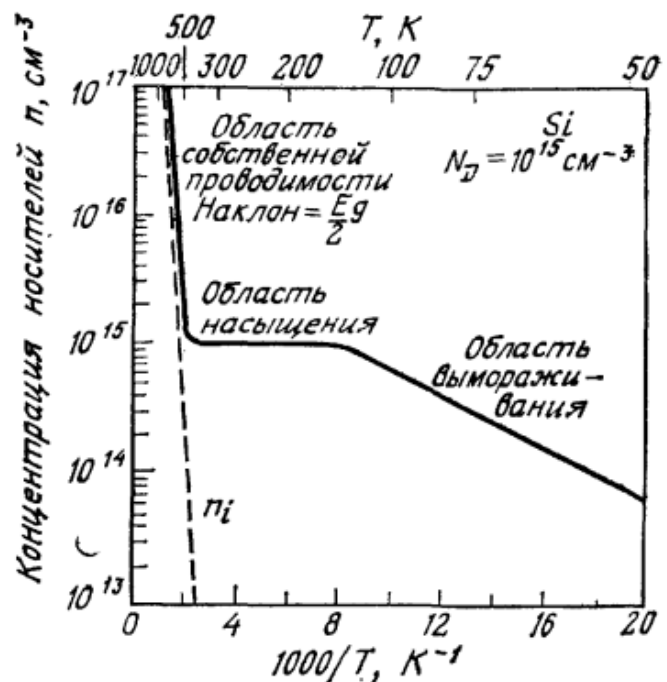
В разделе приводится оценка предельной рабочей температуры КНИ чувствительного элемента типа ПДХ.

Повышение температуры в полупроводниках вызывает повышение собственной концентрации носителей тока согласно рисунку 38а. Это явление связано с эффектом термической генерации электронно-дырочных пар. Этот эффект согласно рисунку 38б должен ограничивать рабочую температуру традиционных кремниевых приборов значением порядка 200 °С. Однако, реальная предельная рабочая температура $T_{пред}$ как правило еще меньше. Это связано с возрастающими токами утечки через р-п переходы. Кроме того, в ЭХ меньшая концентрация имплантированной примеси обеспечивает более высокие значения индуцируемого э.д.с. Холла. Для ЭХ концентрация примеси обычно составляет порядка 10^{14} см^{-3} связи с чем их реальная $T_{пред}$ составляет около 120 °С [46,48].

Существуют технологические методы, позволяющие повысить рабочую температуру кремниевых приборов. Одним из них является применение структур «кремний на изоляторе» (КНИ). Прибор изготавливается в тонком слое кремниевой пленки, отсеченной от подложки слоем диэлектрика, как правило, SiO_2 . Слой диэлектрика представляет собой барьер, предотвращающий утечку термогенерированных в подложке носителей тока в активный приборный слой, поэтому влияние токов утечки в КНИ приборах заметно слабее по сравнению с Si аналогами. В КНИ МОП транзисторах предельная рабочая температура составляет порядка 200-220 °С [20].



а)



б)

Рисунок 38 – Графики зависимостей собственной концентрации n_i для разных полупроводников и (а) примесной концентрации кремния (б) от температуры [47]

Как было ранее сказано ПДХ изготовлен на КНИ структуре и представляет собой интеграцию традиционного элемента Холла и двухзатворного полевого МДП транзистора. В нем приборный слой n-Si (n-Si используется для создания традиционных элементов Холла из-за более высокой подвижности электронов по сравнению с дырками) расположен между двумя слоями пленки диэлектрика SiO_2 , являющимися в то же время подзатворными диэлектриками двух управляющих МДП затворов. Понятно, что ПДХ, будучи выполненным по технологии «кремний на изоляторе», генетически имеет рабочую температуру выше, чем у традиционных кремниевых элементов Холла. Проанализируем допустимую рабочую температуру ПДХ.

Рабочим режимом ПДХ является режим частичного обеднения в объеме пленки Si и аккумуляции носителей заряда на границах Si-SiO₂ (рисунок 2). Для анализа целесообразно представить эти области в виде параллельно включенных сопротивлений, как показано на рисунке 39.

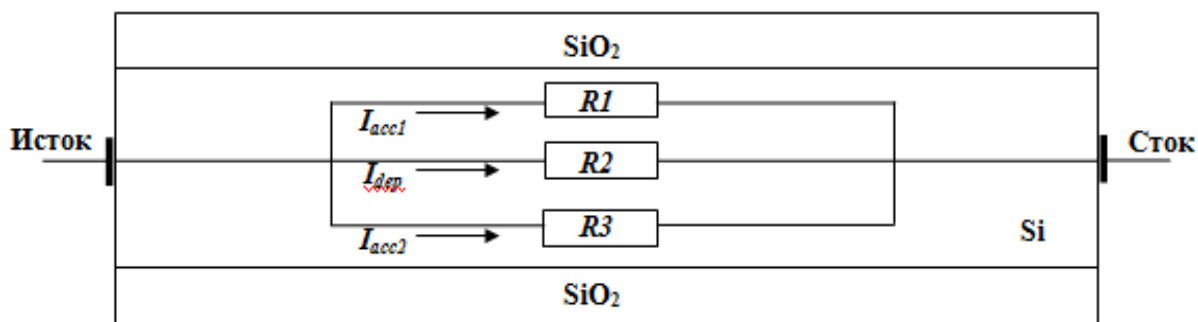


Рисунок 39 – Схематическое представление элементов пленки Si ПДХ

В рабочем режиме, когда потенциалы на затворах ПДХ больше нуля ($V_g > 0$), сопротивление R_2 существенно больше сопротивлений R_1 и R_3 . Это обусловлено аккумуляцией электронов в областях, прилегающих к границам раздела Si-SiO₂ под воздействием эффекта поля. С целью упрощения анализа введем ряд допущений:

- заряд в слоях SiO₂ принимается отсутствующим;
- толщины диэлектриков SiO₂ принимаются равными;
- потенциалы на затворах выбираются равными;
- влиянием подложки можно пренебречь;
- режим работы ПДХ соответствует линейному участку ВАХ, то есть $V_d \leq V_g$;
- заряды поверхностных состояний на границах раздела диэлектрик-полупроводник отсутствуют;
- эффект зарядовой связи в Si пленке ПДХ отсутствует.

Введенные допущения позволяют считать, что сопротивления аккумулярованных областей равны, т.е. можно обозначить $R_1 = R_2 = R$, а,

следовательно, $I_{acc1} + I_{acc2} = I_{acc}$, где I_{acc1} и I_{acc2} – токи, протекающие в аккумулированных вблизи границ разделов SiO_2 областях.

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 [46] в аккумулированных областях и может быть скомпенсирована с использованием специальных схем компенсации, либо с помощью математической обработки. При повышении температуры выше определенного уровня, согласно рисунку 38б, собственная проводимость центральной области начинает вносить существенный вклад в общий ток, что очевидно приводит к изменению характера температурной зависимости э.д.с. Холла и делает невозможным 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

$$n_i(T) \leq 0.01 n_{acc} \quad (6)$$

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

$$I_{dep} \leq 0.01 * I_{acc}. \quad (7)$$

Распределения электронов для вычисления n_{acc} в сечении пленки Si, зажатой между слоями SiO₂, необходимые для анализа предельных рабочих температур ПДХ, получены с использованием программы, осуществляющей их расчет.

Распределения строятся 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:

- электрические утечки через слой SiO₂ отсутствуют;
- атомы легирующих примесей полностью ионизованы.

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

- непрерывность потенциала;
- непрерывность электрической индукции.

Интерфейс программы показан на рисунке 40. В ней имеется возможность задавать следующие параметры структуры ПДХ: толщину пленки Si h , толщины диэлектриков d_1 и d_2 , исходные концентрации электронов в пленке Si n_0 , заряды в диэлектриках Q_1 и Q_2 , ширину запрещенной зоны E , потенциалы на затворах V_1 и V_2 .

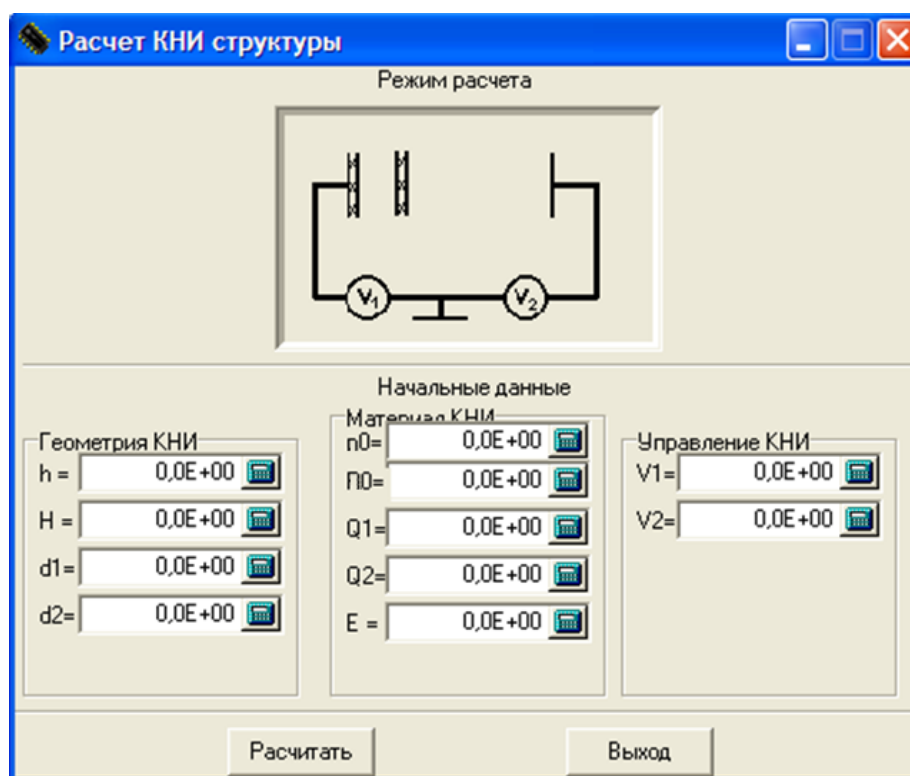


Рисунок 40 – Интерфейс программы, рассчитывающей распределение носителей по толщине кремниевой пленки в ПДХ

В соответствии с указанными ранее допущениями, заряд в слоях SiO_2 не учитывается, толщины SiO_2 задаются равными, потенциалы на затворах задаются равными, а толщина кремниевой подложки задается равной нулю.

Все распределения получены для температуры 300К. Характерный вид получаемых распределений электронов по сечению канала показан на рисунке 41. 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 экспериментальном образце.

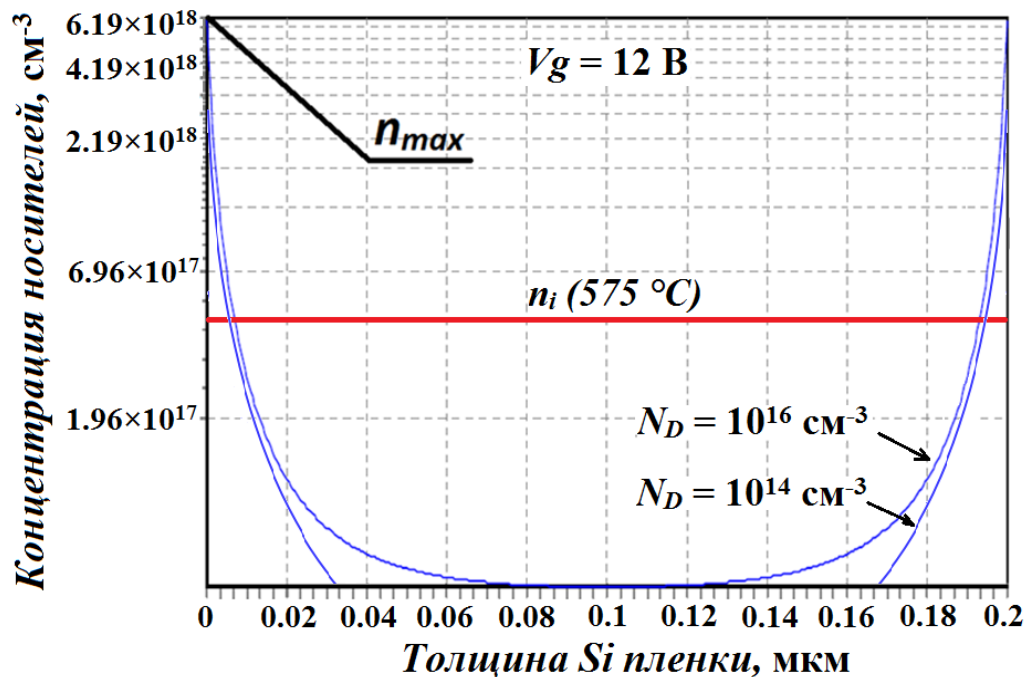


Рисунок 41 – Характерный вид распределения электронов в сечении пленки Si для исходных концентраций доноров $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, потенциал на затворах $V_g = 12 \text{ В}$, толщины слоев SiO_2 $d_1 = d_2 = 0.2 \text{ мкм}$, толщина пленки Si $h = 0.2 \text{ мкм}$

На рисунке 42 приведены зависимости максимальной концентрации электронов в аккумулярованном слое n_{max} от потенциалов на затворах ПДХ при различных исходных концентрациях n_0 . Из графика видно, что при повышении начальной концентрации n_0 до $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с увеличением V_g от 4 В до 38 В величина n_{max} изменяется в пределах одного порядка, в то время как при $n_0 = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ n_{max} изменяется в пределах двух порядков. Это говорит о лучшей управляемости транзистора с помощью затворов при исходной

концентрации $n_0 = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, видно, что при высоких напряжениях V_g (свыше 35 В) значение исходной концентрации n_0 не оказывает существенного влияния на n_{max} .

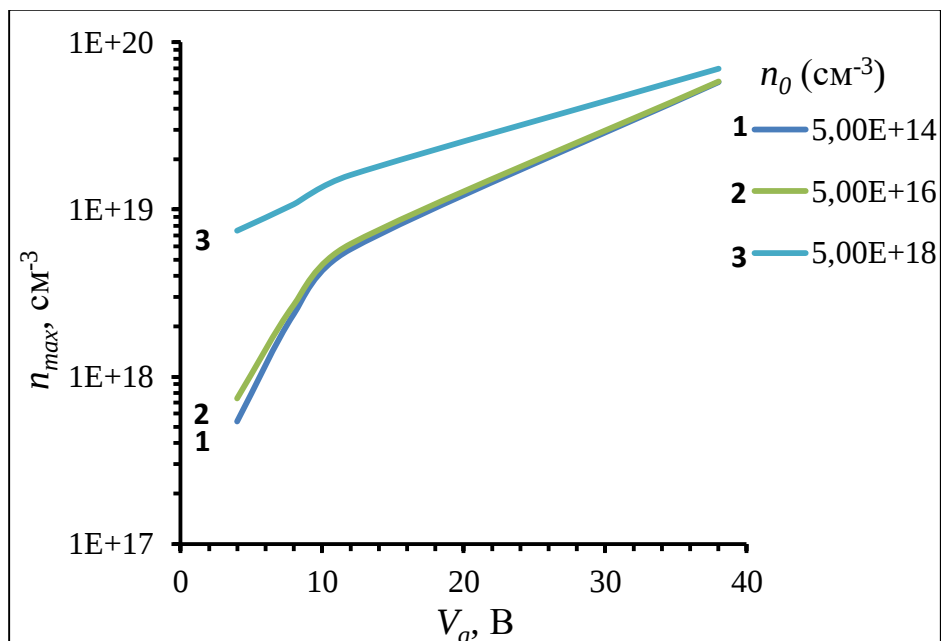


Рисунок 42 – Расчетная зависимость максимальной концентрации электронов в аккумулированном слое Si пленки ПДХ от потенциалов, приложенных к затворам, для различных исходных концентраций n_0

В таблице 4 приведены аналитические зависимости критерия (6) и температур, при которых достигается соответствующее (6) значение n_i в кремнии, для различных исходных концентраций N_d и потенциалах на затворах. При расчете n_{acc} во внимание принимается, что основной ток протекает в тонком аккумулированном слое, поэтому верхняя и нижняя границы вычисления n_{acc} взяты равными n_{max} и $0.01n_{max}$, соответственно. Для концентрации n_0 , равной $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, (7) выполняется только при соответствующих потенциалах на затворах, а именно при 38 В и выше. Для $n_0 = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (7) не выполняется в рассмотренном диапазоне электрических режимов ПДХ. Это связано с тем, что при высоких концентрациях n_0 и низких потенциалах затворов V_g не обеспечивается

достаточная концентрация электронов в аккумулированных слоях, соответствующая выполнению условия (7), задающего условие протекания тока преимущественно в аккумулированных электронами слоях. Таблица позволяет понять, какое требуется напряжение на затворах V_g для достижения определенной $T_{пред}$ при заданной исходной концентрации n_0 . 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. $V_g \leq 12$ В [48], предельную рабочую температуру ПДХ можно оценить примерно в 425 °С при $n_0 = 10^{14}$ см⁻³.

Таблица 4 – Значения критерия (6) 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 (6), см ⁻³	Предельная рабочая температура, соотв. критерию (6), °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
5×10^{16}	4	3.7×10^{15}	-
	8	1.4×10^{16}	-
	12	3.1×10^{16}	-
	38	2.9×10^{17}	575
5×10^{18}	4	3.8×10^{16}	-
	8	5.5×10^{16}	-
	12	8.1×10^{16}	-
	38	3.2×10^{17}	-

Концентрация электронов в аккумулярованном слое также определяется геометрическими параметрами ПДХ, такими как: толщина h пленки Si, толщины d_1 и d_2 слоев диэлектриков SiO₂. На рисунке 43 приведена зависимость величины n_{max} от толщины h для различных исходных концентраций n_0 , потенциал на затворах V_g при этом зафиксирован и равен 12 В. Из графика видно, что утонение Si пленки ПДХ до $h = 0.05$ мкм не оказывает существенного воздействия на величину n_{max} , следовательно, существенного вклада в определение $T_{пред}$ при данных толщинах не вносит.

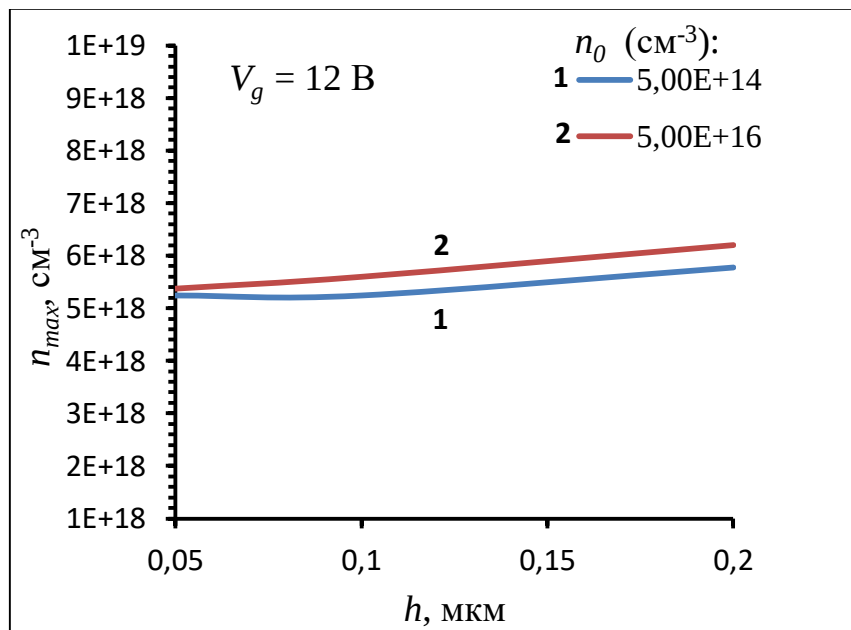


Рисунок 43 – Расчетные зависимости n_{max} от толщины h пленки Si ПДХ для различных n_0 и заданном потенциале затворов V_g

На рисунке 44 представлена зависимость n_{max} от толщины d_1 и d_2 подзатворных диэлектриков для разных концентраций n_0 при постоянном V_g . Как можно заметить из рисунка, утонение подзатворных диэлектриков от 0.5 до 0.1 мкм приводит к увеличению n_{max} более чем на порядок для всех выбранных значений n_0 . Это объясняется увеличением поперечного электрического поля на границах раздела Si-SiO₂ с уменьшением толщины

слоев SiO₂. Таким образом, утоняя подзатворные диэлектрики можно достичь необходимого значения $T_{пред}$ при более низком потенциале на затворах V_g .

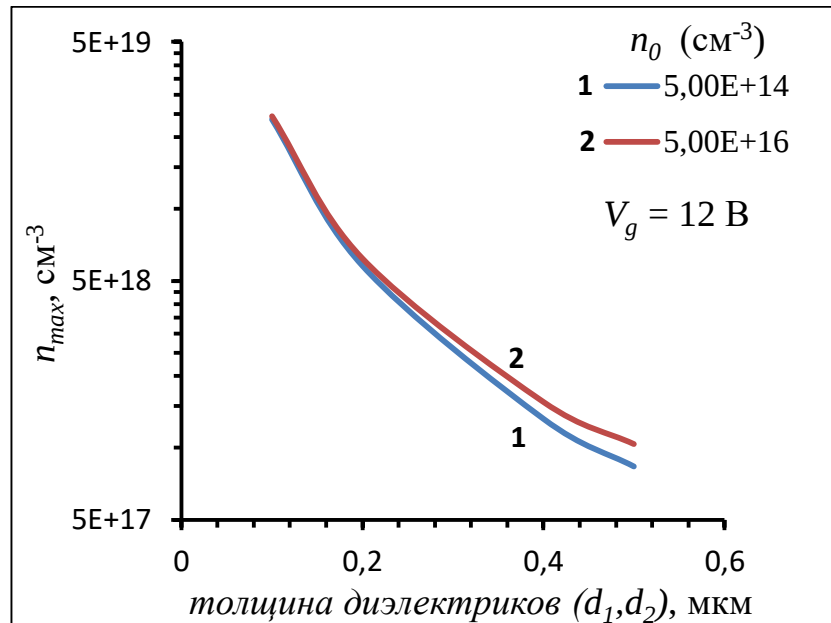


Рисунок 44 – Характерные расчетные зависимости n_{max} от толщины подзатворных диэлектриков d_1 и d_2 для различных исходных концентраций n_0 при фиксированном V_g

Ранее отмечалось, что приведенные выше данные не учитывали наличие встроенного в SiO₂ заряда. В реальности в экспериментальных образцах ПДХ существует встроенный положительный заряд порядка $Q_0 = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ в обоих диэлектриках, что соответствует напряжению плоских зон около 2 В. На рисунке 45 приведены зависимости n_{max} от величины встроенного в диэлектрики заряда. Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что введение дополнительного положительного заряда в подзатворные диэлектрики позволит дополнительно повысить предельную рабочую температуру ПДХ.

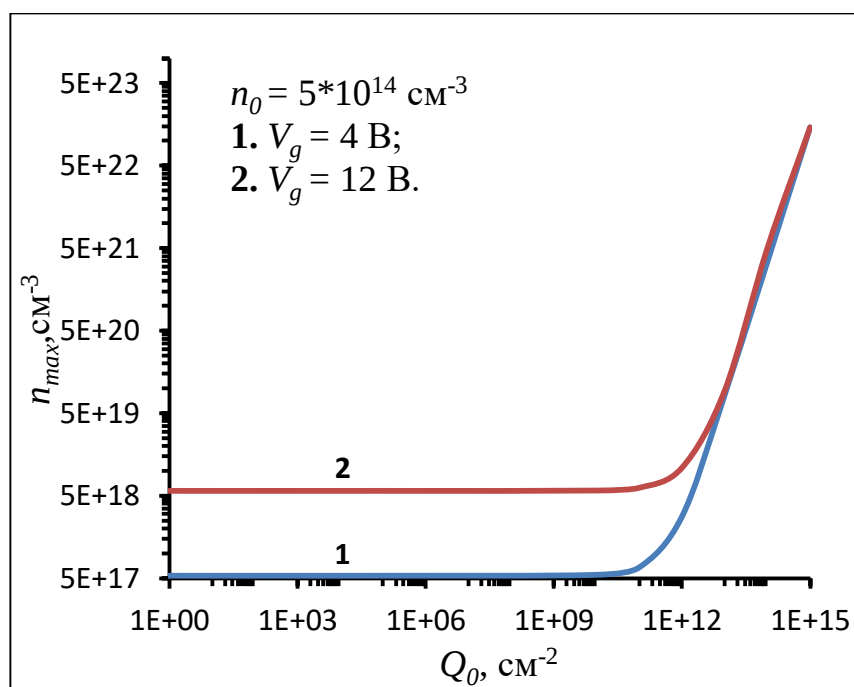


Рисунок 45 – Характерные расчетные зависимости n_{max} от величины встроенного в диэлектрики заряда Q_0 для постоянной исходной концентрации $n_0 = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и различных потенциалов на затворах V_g

Как было ранее сказано в кремнии подвижность электронов с повышением температуры снижается, что оказывает негативное воздействие на величину индуцируемого э.д.с. Холла. Этот эффект обычно учитывают путем математической обработки и введением соответствующей поправки в измерения э.д.с. Холла [48,49] с помощью введения дополнительного термочувствительного элемента, показания которого определяют вводимую поправку измерения магнитного поля.

В случае ПДХ избежать усложнения конструкции датчиков блоком компенсации влияния температуры можно благодаря использованию возможностей затвороного управления. Этого можно достичь схемным путем, как, например, показано на рисунке 46 [50]. Данная схема через обратную связь осуществляет перестройку рабочей точки ПДХ при уменьшении V_H в связи с повышением температуры, тем самым стабилизируя измерения V_H . Приведенные в таблице 5 данные позволяют судить о большой эффективности изложенного подхода. Кроме того, как было показано ранее,

ПДХ сам по себе может служить датчиком температуры, это далее будет показано на примере датчиков температуры с частотным выходом.

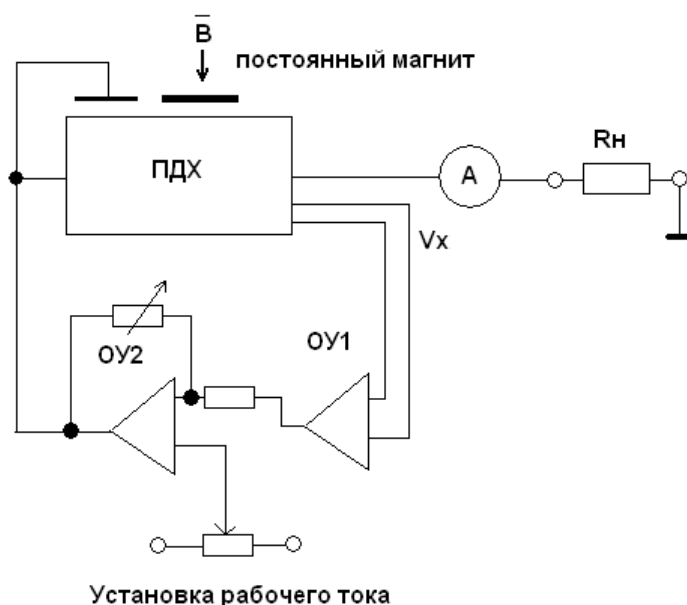


Рисунок 46 – Схема для температурной стабилизации измерений V_H

Таблица 5 – Температурная чувствительность ПДХ и ПДХ с применением схемы стабилизации измерений э.д.с. Холла

Включение	Коэффициент температурной чувствительности, %/°C
ПДХ	0.4
ПДХ со схемой температурной стабилизации V_H .	0.01

Проведенный анализ температурной стойкости ПДХ показал, что в идеальном случае достижима рабочая температура в 575 °C. На практике было показано, что ПДХ сохраняет свою функциональность как минимум при температуре 330 °C [51-54]. Такая температура достигается за счет установления с помощью двухзатворной полевой управляющей системы режима, при котором в кремниевой пленке ПДХ реализуются слои с различной степенью проводимости – аккумулярованные носителями тока на

границах Si-SiO₂ и обедненный носителями тока в объеме пленки. При этом потенциал, подаваемый на затворы ПДХ, является важным параметром при определении предельной рабочей температуры. Также можно отметить, что дополнительно значение предельной рабочей температуры можно повысить, например, утонением подзатворных слоев SiO₂, а также введением дополнительного положительного заряда в подзатворные окислы SiO₂.

Наличие двухзатворной полевой системы позволяет также увеличить точность измерений V_H за счет применения специальных схем обратной связи по напряжению и току.

Безусловно, проведенный анализ идеализирован и скорее является оценкой предельных рабочих температур «сверху» ввиду сделанных допущений, однако и в таком виде позволяет произвести прогноз функционирования ПДХ при повышенных температурах при изменении тех или иных его физических характеристик. В реальности же предельные рабочие температуры могут отличаться от приведенных выше оценок.

Рабочая температура ПДХ может быть и значительно выше в зависимости от функционального назначения. Например, если необходимо зафиксировать лишь факт появления магнитного поля, а не с высокой точностью определить его индуктивность, то предельная температура функционирования может быть еще выше. Это актуально, например, для высокотемпературных счетчиков оборотов.

Проведенная оценка позволяет сделать заключение о возможности создания на основе ПДХ датчиков и датчиковых систем, в частности датчиков с частотным выходом, способных функционировать при температурах, достигающих 575 °C и выше, например, в датчиках, в которых ПДХ используется отдельно от схемы обработки сигнала и выступает в качестве регистрирующего (цифровой), не подразумевающего точности измерений, чувствительного элемента ($T_{пред}$ может достигать 700 °C).

3.4 Выводы к главе

В главе изучены свойства КНИ чувствительного элемента транзисторного типа на примере полевого датчика Холла, объединяющего в своей конструкции двухзатворный полевой транзистор с МДПДМ полевой управляющей системой, выполненный по КНИ-технологии и управляемый полем кремниевый элемент Холла.

Показано, что в таком чувствительном элементе, функционирующем в режиме аккумуляции основных носителей тока – электронов, использование двухзатворного включения обеспечивает повышение индуцируемого э.д.с. Холла до двух раз по сравнению с использованием одного из затворов. Это объясняется повышением подвижности электронов в аккумулированных токопроводящих каналах на границах Si-SiO₂, вызванным возникающим при таком включении затворов эффектом зарядовой связи. Сделано предположение, что в приборе такого типа эффект зарядовой связи между затворами приводит к изменению формы центроида заряда в канале.

Изучение электрических характеристик ПДХ показало, что использование в КНИ чувствительном элементе такого типа МДПДМ полевой системы позволяет осуществлять управление выходными параметрами датчика, в частности величиной регистрируемого э.д.с. Холла. Эта особенность используется в работе для разработки датчиков с частотным выходом, рабочая частота которых может управляться выбором электрического режима включения КНИ чувствительного элемента (ПДХ). Измеренная температурная зависимость тока канала позволяет судить о возможности использования такого чувствительного элемента в качестве управляемого электрическим полем КНИ термотранзистора (полевого датчика температуры - ПДТ). Сделано предположение, что конструкция КНИ чувствительного элемента, типа ПДХ является универсальной и позволяет помимо магнитного поля измерять различные внешние воздействия, изменяющие ток канала (температуру, ионизирующую радиацию и др.).

Анализ рабочих температур полевого датчика Холла показывает возможность его функционирования при температурах по крайней мере на 400 °С выше, чем предельная рабочая температура для датчиков, выполненных в объемном кремнии и по крайней мере на 200 °С выше, чем предельная рабочая температура КНИ МОП транзисторов. Показано, что конкретное значение достижимых может достигать 575 °С. При этом, полученные значения определены для использования такого КНИ чувствительного элемента в датчиках с аналоговым выходом, в то же время, при использовании в составе магнитоуправляемых датчиков с цифровым выходом предельная температура может достигать значений 700 °С.

Глава 4. Датчики магнитного поля с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа

В разделе рассмотрены три типа конструкций датчиков магнитного поля с частотным выходом на основе КНИ ПДХ:

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

4.1 Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе скачков тока в канале ПДХ

Характерной особенностью ВАХ ПДХ является наличие резких увеличений - скачков рабочего тока I при незначительных увеличениях напряжения (рисунок 47). Похожие скачки тока на ВАХ и описание возникновения S-образного участка имеет и КНИ транзистор, использованный для создания генератора электрических колебаний в [31], поэтому для создания датчика с частотным выходом за основу была взята схема, приведенная в этом источнике. Она дополнена обратной связью для обеспечения отклика частоты электрического сигнала ДЧВ на появление внешнего воздействия. Схема ДЧВ на основе скачков тока в КНИ ПДХ приведена на рисунке 24.

Проявление эффекта скачков в КНИ ПДХ в [18] объясняется возникновением лавинного умножения электронов и дырок вблизи области стока. Дополнительный потенциал в кремниевом теле чувствительного элемента, вызванный полевым разделением рожденных лавиной электронов и дырок при определенных значениях приводит к возникновению паразитного транзистора, уменьшающего пороговое напряжение (так

называемый кинк-эффект). В результате этого на вольт-амперных характеристиках ПДХ можно увидеть скачки тока. Наличие двух скачков в [18] связывается с наличием двух токопроводящих аккумулированных слоев, одного – вблизи раздела кремния с подзатворным SiO_2 , второго – вблизи раздела кремния с захороненным слоем SiO_2 КНИ структуры.

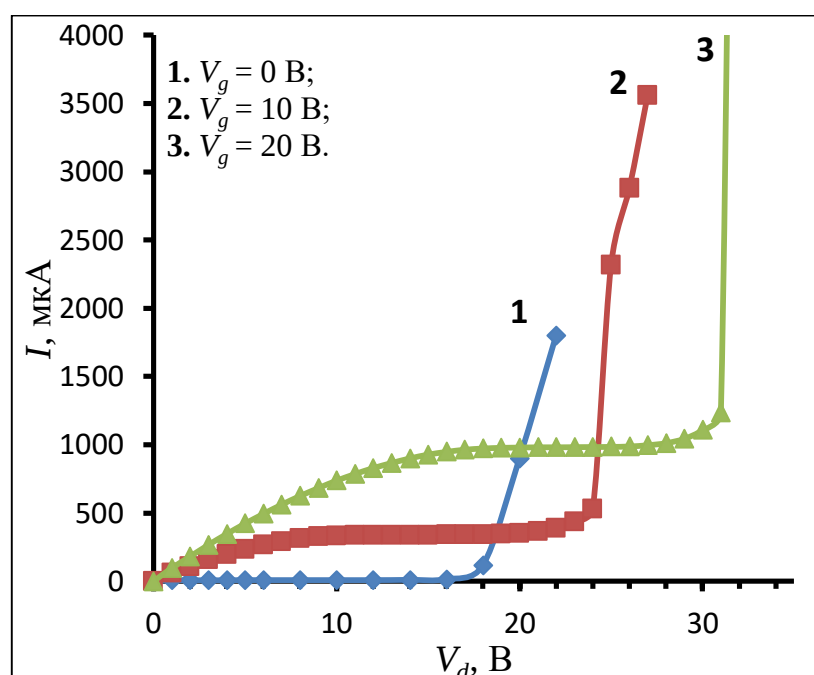


Рисунок 47 – Семейство вольт-амперных характеристик ПДХ с областью лавинного размножения носителей

Принципиально измерение магнитного поля в ДЧВ происходит за счет того, что переменный холловский сигнал модулирует постоянный потенциал на затворах ПДХ, что приводит к изменению рабочего режима ПДХ. Это в свою очередь влечет за собой изменение частоты электрического сигнала на выходе пропорционально изменению величины индукции магнитного поля, воздействующего на ПДХ.

Рабочие режимы созданного ДЧВ ограничиваются потенциалами затворов V_g в диапазоне от -0.5 В до $+0.5$ В. В указанных режимах характерная форма выходного сигнала, полученного ДЧВ магнитного поля,

основанного на скачках тока в ПДХ представлена на рисунке 48. Полученный сигнал имеет высокую стабильность и может быть использован для применения в цифровых системах и системах радиочастотной передачи информации. При $|V_g| > 0.5$ сигнал нестабилен.

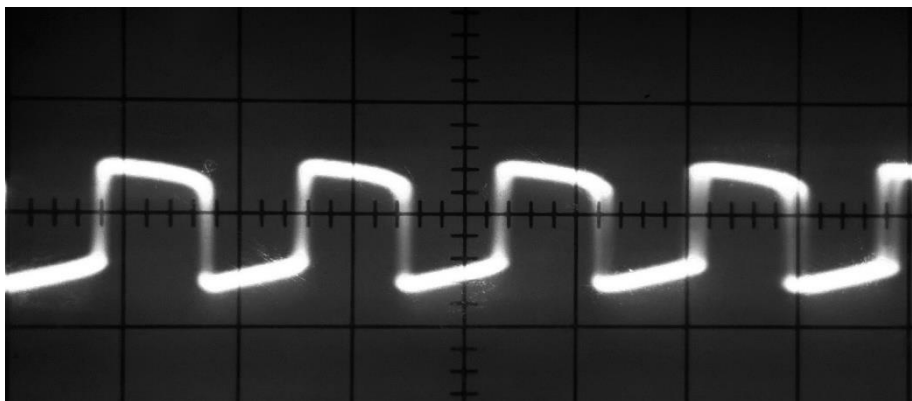


Рисунок 48 – Выходной сигнал датчика с частотным выходом на основе собственных осцилляций ПДХ с дополнительной обратной связью по напряжению. Получен при $V_{dd} = 24$ В, при этом $V_d = 19.3$ В

Рабочие режимы ДЧВ на основе скачков тока в ПДХ определены как возможностью регистрировать воздействие магнитного поля, так и возможностью осуществлять подстройку рабочей частоты ДЧВ через изменение потенциала, приложенного к затворам ПДХ. На рисунке 49 представлены зависимости рабочей частоты ДЧВ от потенциалов, поданных на затворы ПДХ, при различных напряжениях питания ДЧВ в отсутствии воздействия магнитного поля. Из приведенных зависимостей видно, что крутизна управления частотным выходом ДЧВ с помощью изменения потенциала на затворах ПДХ отличается в зависимости от выбранных значений V_g . Для области $-0.5 \leq V_g \leq 0$ крутизна управления составляет в среднем 400 Гц/В, в то время как для области $0 \leq V_g \leq 0.5$ крутизна выше и в среднем составляет около 1.5 кГц/В. Стоит отметить, что характер зависимостей, приведенных на рисунке 49, слабо зависят от напряжения питания схемы ДЧВ.

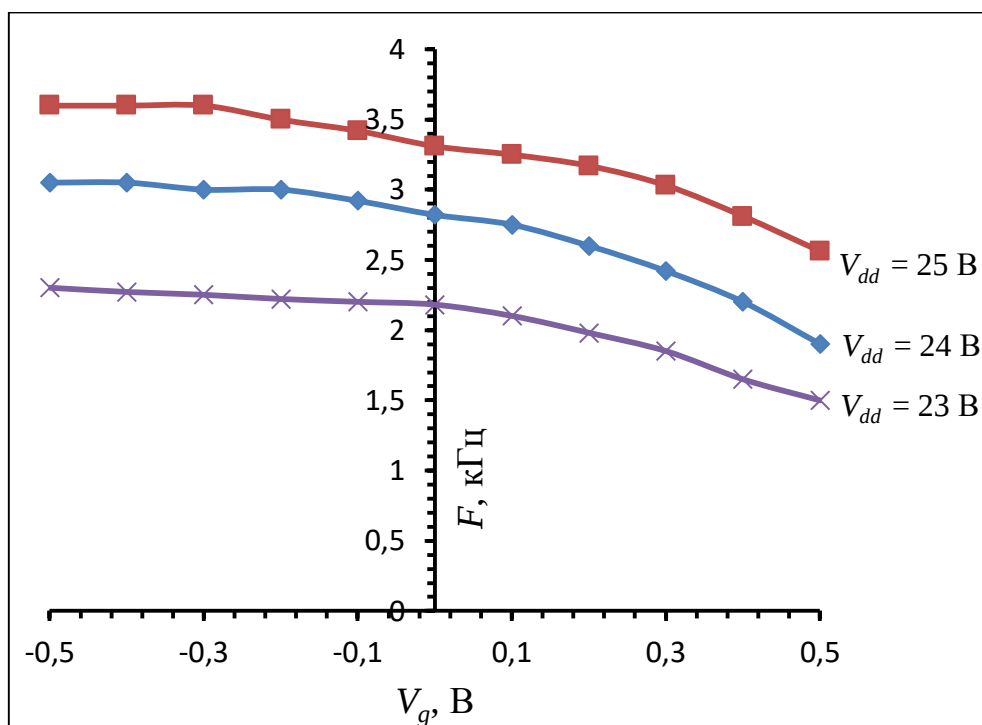


Рисунок 49 – Зависимости частоты ДЧВ на основе скачков тока в ПДХ от потенциалов на затворах ПДХ (а) при различных напряжениях питания ДЧВ

На рисунке 50 приведены зависимости отклонения рабочей частоты dF ДЧВ под воздействием магнитного поля с индукцией 50 мТл от потенциала затворов V_g ПДХ для различных напряжений питания схемы ДЧВ. Зависимости показывают, что максимальная чувствительность ДЧВ достигается при потенциале на затворах $V_g = -0.5$ В и составляет около 22 Гц/мТл при напряжении питания схемы ДЧВ $V_{dd} = 23$ В и достигает 48 Гц/мТл при напряжении питания схемы ДЧВ $V_{dd} = 25$ В. Из полученных зависимостей видно, что зависимости, представленные на рисунке 50, имеют нелинейный вид в исследованном диапазоне потенциалов на затворах ПДХ.

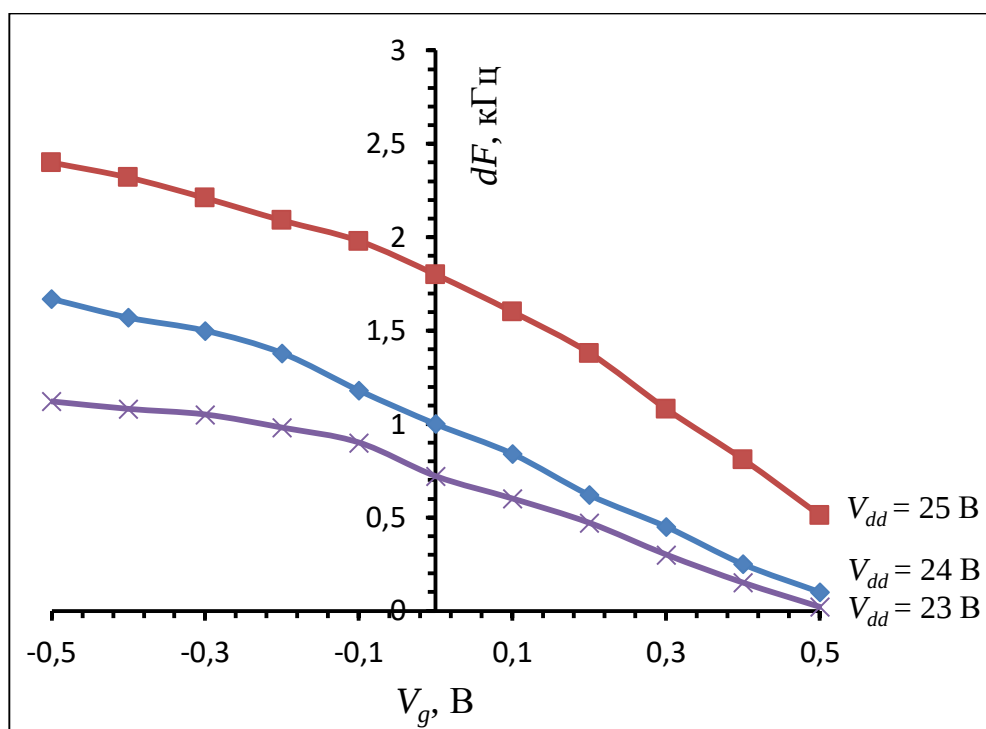


Рисунок 50 – Зависимость изменения рабочей частоты ДЧВ под воздействием магнитного поля от потенциалов на затворах ПДХ при различных напряжениях питания схемы ДЧВ

На рисунке 51 представлены экспериментальные зависимости изменения частоты ДЧВ от величины индукции магнитного поля, воздействующего на ПДХ при трех различных потенциалах на затворах ПДХ. Видно, что 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, для кривой, соответствующей $V_g = -0.3$ 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.

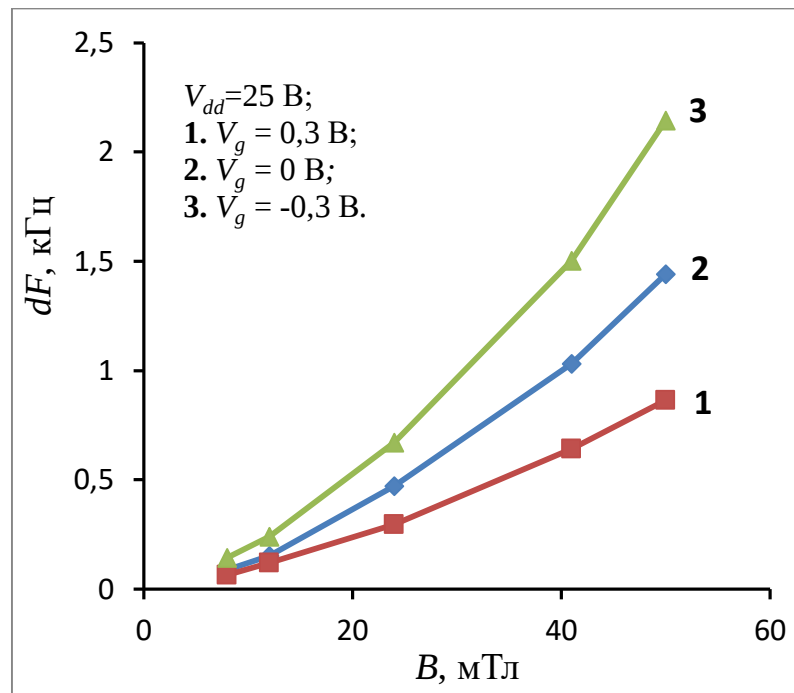


Рисунок 51 – Изменение рабочей частоты ДЧВ на основе осцилляций в ПДХ в зависимости от величины приложенного магнитного поля

Таким образом, использование скачков тока в ПДХ в сочетании с оптимизированной схемой генератора, приведенного в [31] могут быть положены в основу датчика магнитного поля с частотным выходом. Такой подход имеет ряд особенностей:

1. Требуются специальные режимы электропитания ДЧВ, в частности повышенные напряжения питания схемы. В экспериментах величина V_{dd} составляла от 23 В до 25 В.
2. ДЧВ характеризуется узким диапазоном управления частотой с помощью изменения потенциала на затворах ПДХ. В экспериментах диапазон управления составлял от -0.5 В до +0.5 В. При этом крутизна управления различна для различных диапазонов значений V_g : около 400 Гц/В для диапазона $-0.5 \leq V_g \leq 0$ и около 1.5 кГц/В для $0 \leq V_g \leq 0.5$.
3. Основные зависимости, характеризующие работу разработанного ДЧВ магнитного поля, такие как: зависимости частоты ДЧВ F и изменения частоты dF под воздействием магнитного поля от потенциала затворов

ПДХ V_g , зависимости изменения частоты dF от значения индукции воздействующего магнитного поля, имеют нелинейный характер.

4. Максимальная чувствительность ДЧВ магнитного поля на основе скачков тока в канале ПДХ в экспериментах составила 48 Гц/мТл. Она была получена при напряжении питания схемы ДЧВ $V_{dd}=25$ В, потенциале затворов $V_g=-0.5$ В и воздействии на ПДХ магнитного поля с индукцией 50 мТл.

4.2 Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе ПДХ, включенного в схему автогенератора

В обзоре литературы было показано, что различные схемы автогенераторов могут быть использованы для создания датчиков с частотным выходом. Для создания ДЧВ с использованием КНИ ПДХ использована схема автогенератора на операционном усилителе, в ней объединен традиционный подход к усилению холловского сигнала КНИ ПДХ с его участием в формировании частотного электрического сигнала на выходе. Схема такого ДЧВ приведена на рисунке 25.

Прежде всего, была исследована возможность управления исходной частотой датчика (т.е. частоты в отсутствии внешних воздействий на ПДХ) с помощью изменения электрических режимов работы ПДХ. В таблице 6 приведены экспериментальные данные [55,56], демонстрирующие возможность управления частотой датчика в отсутствие магнитного поля с помощью изменения потенциала на затворах ПДХ. Из данных таблицы следует, что крутизна управления частотой с помощью изменения потенциала затворов составляет 7 кГц/В в исследуемом диапазоне значений потенциала.

Зависимость изменения рабочей частоты датчика от индукции внешнего магнитного поля представлена на рисунке 52 [55,56]. Из

графика видно, что в целом зависимости линейны для различных вариаций потенциалов на управляющих затворах.

Таблица 6 – Зависимость рабочей частоты датчика от электрических режимов питания ПДХ

$V_d, \text{В}$	$V_g, \text{В}$	$F, \text{кГц}$
8	6	225
	8	217
	10	197

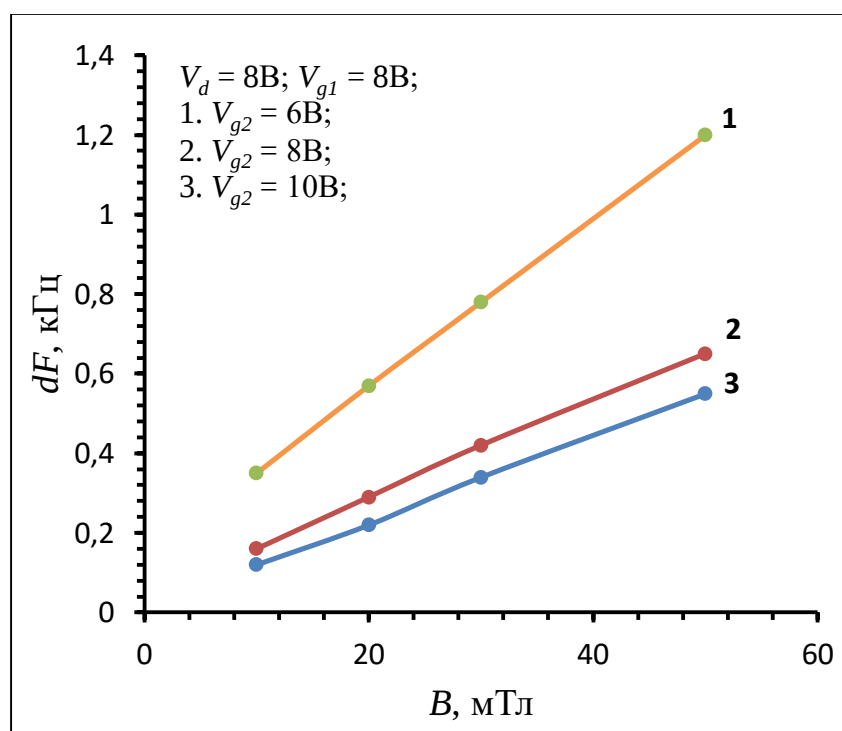


Рисунок 52 – Зависимость изменения рабочей частоты ДЧВ от индукции воздействующего на ПДХ магнитного поля при различных потенциалах на управляющих затворах

Таким образом, ПДХ может быть использован для создания автогенераторных ДЧВ магнитного поля с управляемой рабочей частотой. Среди особенностей рассмотренного подхода можно отметить следующие:

1. Используется операционный усилитель для создания и поддержания устойчивых колебаний электрического сигнала на выходе ДЧВ.
2. Крутизна управления рабочей частотой ДЧВ с помощью изменения потенциала затворов ПДХ составляет порядка 7 кГц/В при исследованных электрических режимах работы ПДХ.
3. Максимальная чувствительность в исследованных режимах составляет около 25 Гц/мТл.

4.3 Датчик магнитного поля с частотным выходом на основе ПДХ и схемы мультивибратора

В последней части литературного обзора рассматривались ДЧВ на основе схем транзисторных аналогов негатронов. Было показано, что такие датчики обладают простотой конструкции, высокой чувствительностью и воспроизводимостью результатов. Очевидно, что в таких датчиках можно использовать выбранный оригинальный чувствительный элемент – ПДХ.

Конструкция разработанного ДЧВ магнитного поля, использующая ПДХ, приведена в главе 2.2 на рисунке 26. Как было описано, такой ДЧВ представляет собой управляемый бистабильный мультивибратор с дополнительной цепью управления частотой выходного электрического сигнала.

В настоящей работе было проведено моделирование разрабатываемого ДЧВ магнитного поля в программе для разработки и отладки электронных схем Multisim 12. Схема, используемая для моделирования, приведена на рисунке 53. Для эмуляции работы ПДХ в данной схеме использовались дополнительные источники напряжения V2 и V3. С помощью них эмулировались напряжения, возникающие на холловских контактах при различных электрических режимах включения ПДХ в отсутствие и

присутствии магнитного поля. Точные значения напряжений источников V_2 и V_3 выбирались исходя из данных, приведенных на рисунках 32-35, 54.

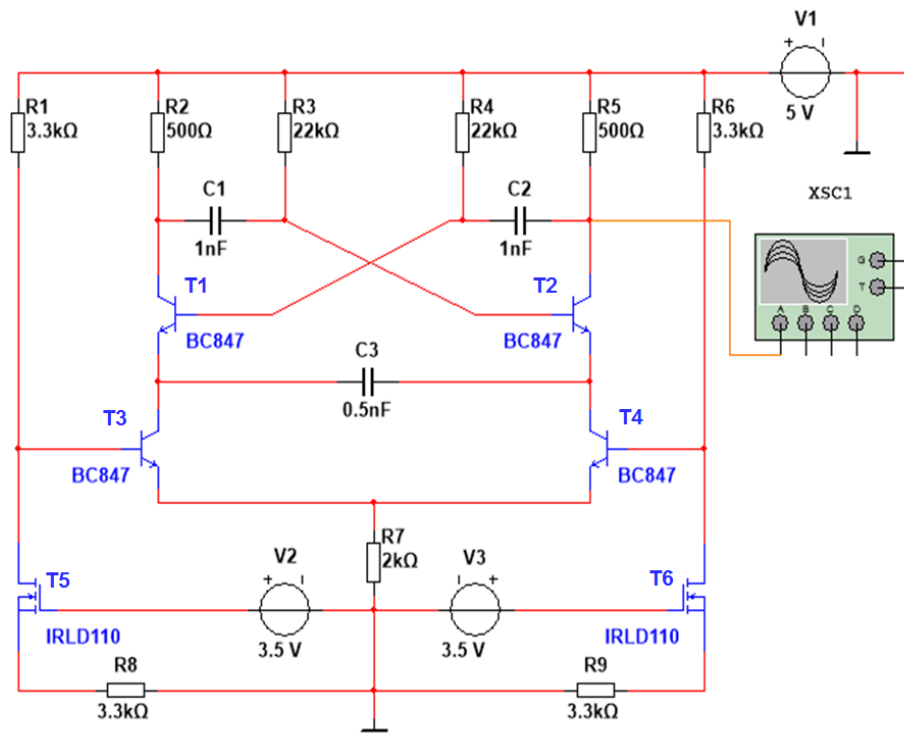


Рисунок 53 – Модель магнитометрического ДЧВ в программе Multisim 12

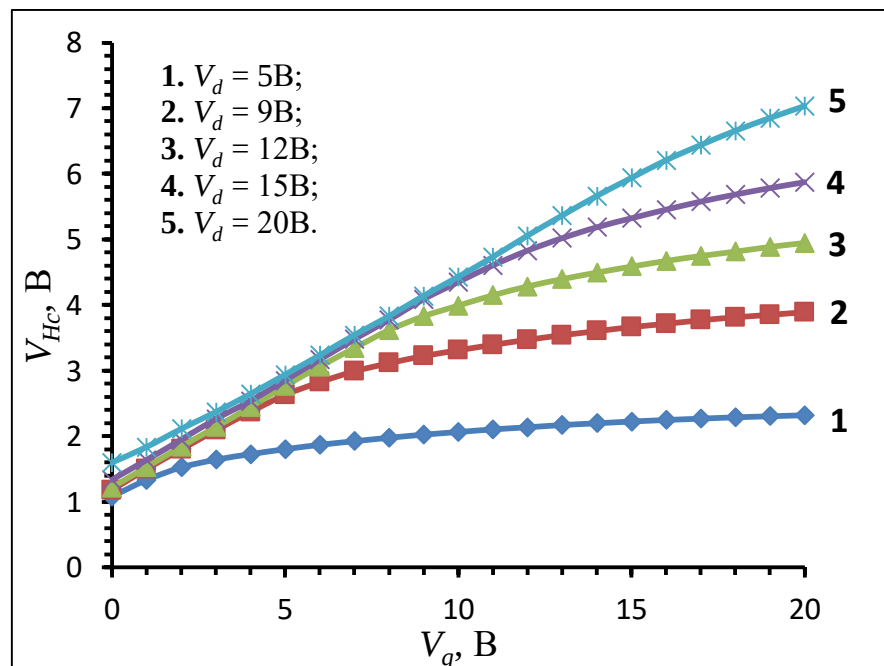


Рисунок 54 – Зависимость напряжения на одном из холловских контактов ПДХ V_{Hc} от потенциала на затворах при различных напряжениях питания V_d

Форма выходного сигнала моделируемой схемы ДЧВ представлена на рисунке 55. Полученная форма выходного сигнала позволяет использовать его в системах радиочастотной передачи информации, в дальнейшей цифровой обработке сигнала, в том числе позволяет представить сигнал в виде последовательного двоичного кода.

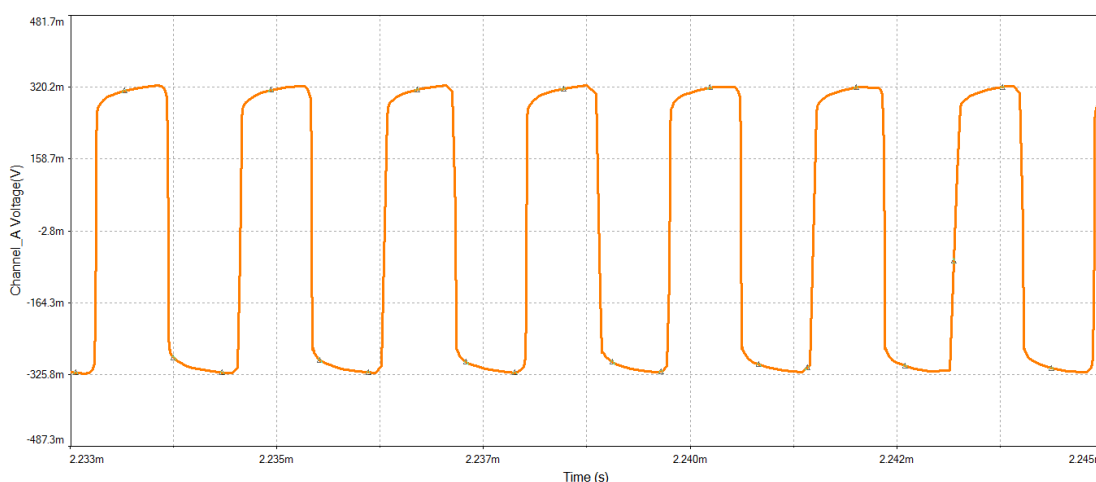


Рисунок 55 – Характерная форма выходного сигнала Multisim - модели ДЧВ с использованием ПДХ. Представленный сигнал зафиксирован при эмуляции режима работы ПДХ $V_{dd} = 5$ В, $V_d = 9$ В, $V_g = 10$ В, в отсутствии магнитного поля

На рисунке 56 приведены характерные зависимости частоты на выходе ДЧВ от потенциала затворов ПДХ, полученные при моделировании в Multisim 12. Пунктиром ограничена область, в которой помимо возможности управления частотой ДЧВ реализуется также возможность регистрации воздействия на ПДХ магнитного поля. Обозначенная область потенциалов на затворах является основной областью функционирования моделируемого прибора [57]. Обсуждение подходов к управлению этой областью, в частности динамическим диапазоном крутизной управления рабочей частотой ДЧВ приведены в главе 6.

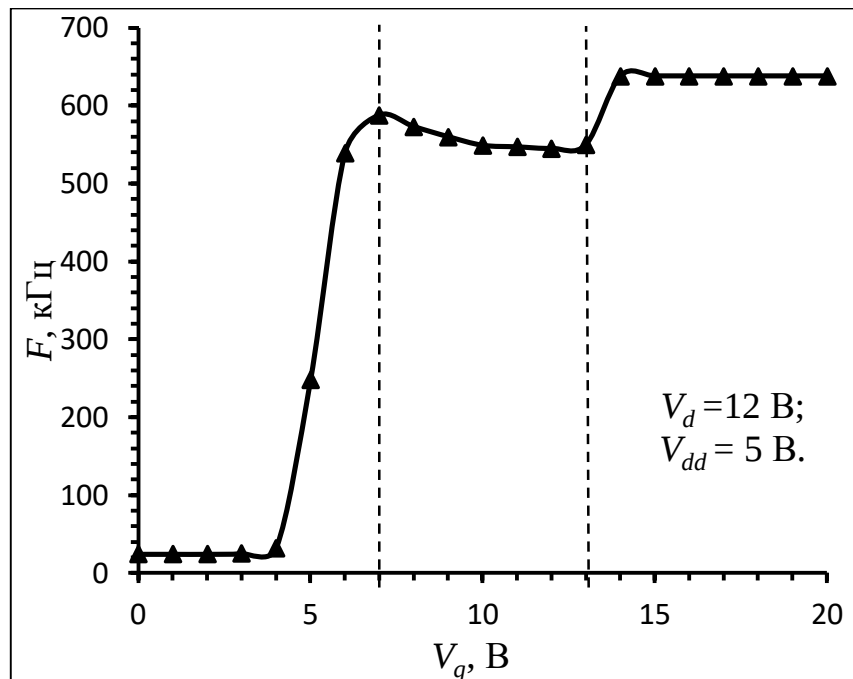


Рисунок 56 – Характерная зависимость частоты электрического сигнала на выходе ДЧВ от потенциала на затворах ПДХ. Пунктиром выделена основная рабочая область

На рисунках 57, 58 приведены основные исследуемые характеристики моделируемых ДЧВ. Рисунок 57 демонстрирует возможности управления частотой ДЧВ с помощью изменения электрических режимов работы ПДХ. Можно отметить, что зависимости имеют линейный характер. При этом крутизна управления возрастает с 6.3 кГц/В при $V_d = 12$ В до 13 кГц/В при $V_d = 20$ В.

На рисунке 58 приводятся результаты моделирования ДЧВ, при котором на ПДХ воздействует магнитное поле с индукцией 50 мТл. На графике представлены зависимости изменения частоты электрического сигнала на выходе ДЧВ от потенциалов затворов при воздействии на ПДХ магнитного поля. Видно, что при всех исследуемых значениях V_d в диапазоне 12-20 В зависимости линейны. Максимально достигнутое при моделировании значение чувствительности достигает порядка 4 кГц/мТл при частоте порядка 550 кГц.

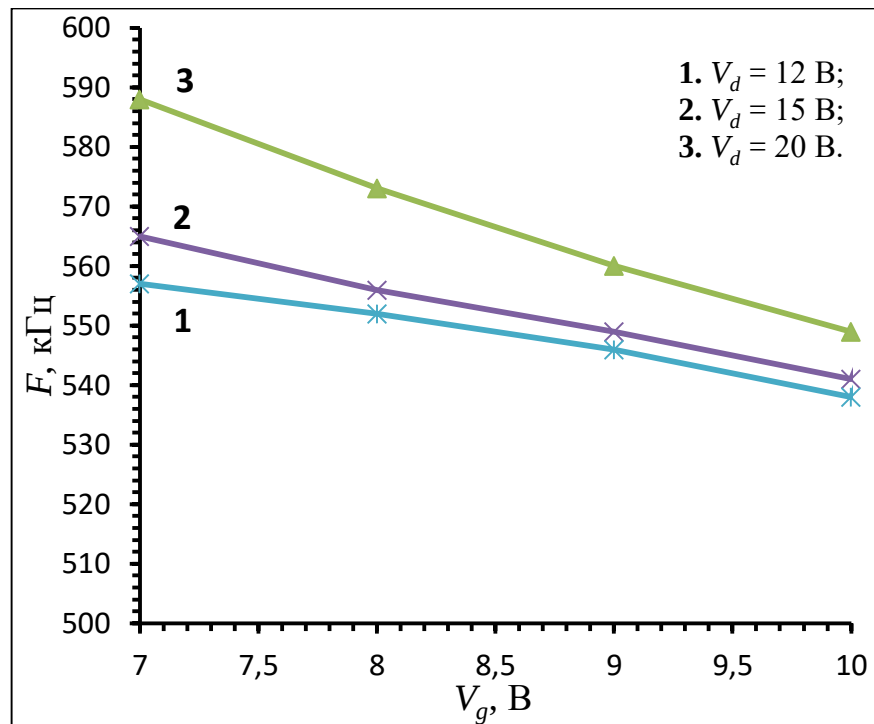


Рисунок 57 – Зависимость частоты электрических импульсов на выходе смоделированного в Multisim 12 ДЧВ от электрических режимов включения ПДХ

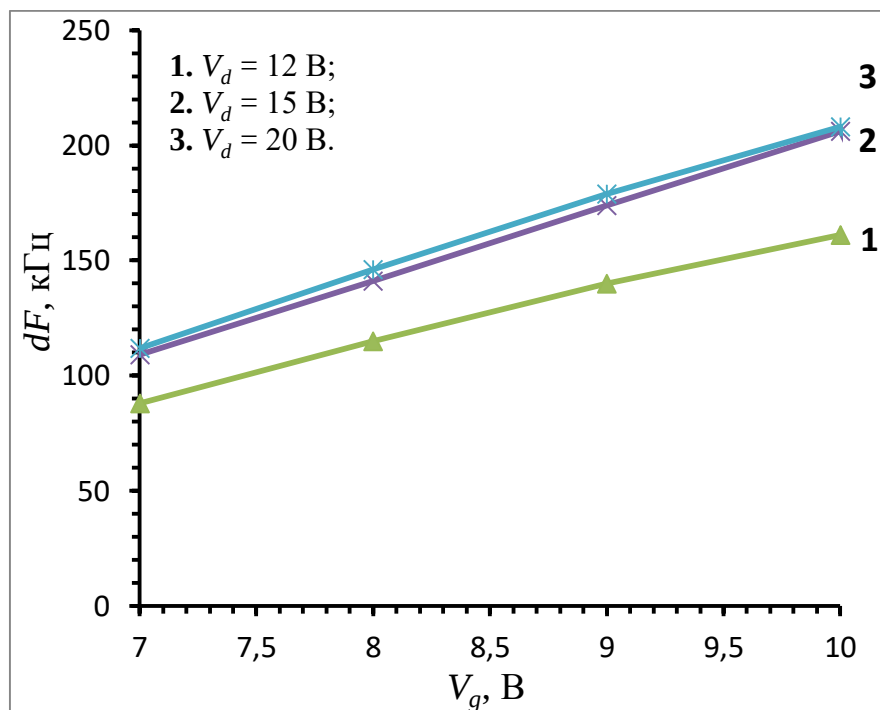


Рисунок 58 – Изменение частоты электрических импульсов Multisim - модели магнитометрического ДЧВ при воздействии магнитного поля величиной $B = 50\text{ мТл}$ на ПДХ при различных электрических режимах работы ПДХ

Макет ДЧВ на основе бистабильного мультивибратора создан в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 26. Фотография полученного макета приведена на рисунке 59.

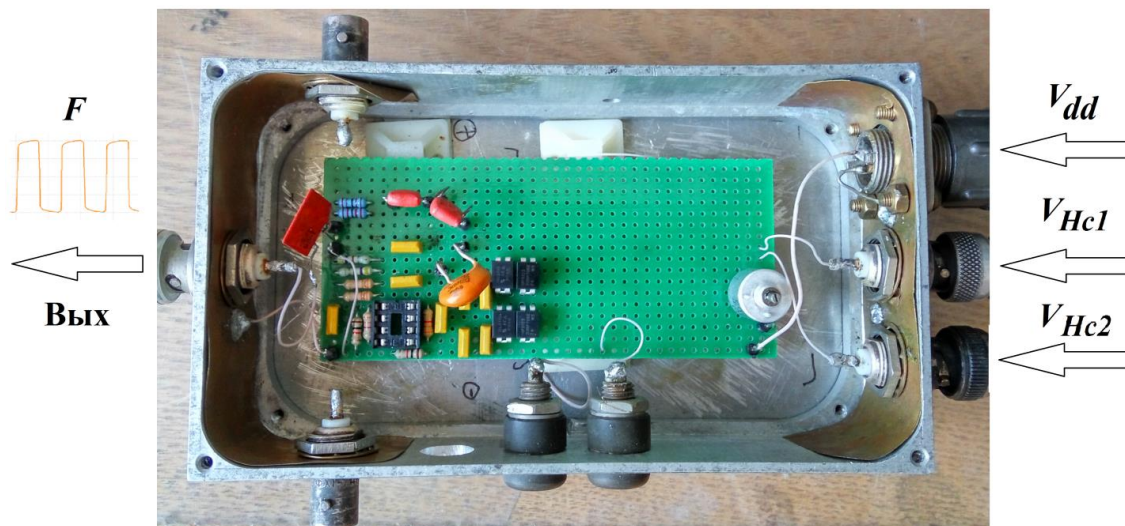


Рисунок 59 – Макет ДЧВ на основе бистабильного мультивибратора, использующий ПДХ в качестве чувствительного элемента. V_{Hc1} и V_{Hc2} – напряжения с каждого из холловских контактов ПДХ

Форма выходного электрического сигнала макета ДЧВ соответствует форме сигнала, полученного при моделировании ДЧВ в Multisim, приведенной на рисунке 55. Кроме того, диапазон потенциалов затворов ПДХ, соответствующий основной области функционирования разработанного прибора, также соответствует значениям, полученным при моделировании схемы в Multisim, то есть 7-10 В.

Зависимости, приведенные на рисунке 60, характеризуют возможность управления рабочей частотой ДЧВ с помощью изменения электрических режимов включения ПДХ [56-60]. При напряжении питания ПДХ $V_d = 9$ В возможность управления существенно не проявляется, однако при повышении напряжения питания до 15-20 В крутизна управления достигает порядка 40 кГц/В, при этом имея практически линейную зависимость от потенциала затворов ПДХ.

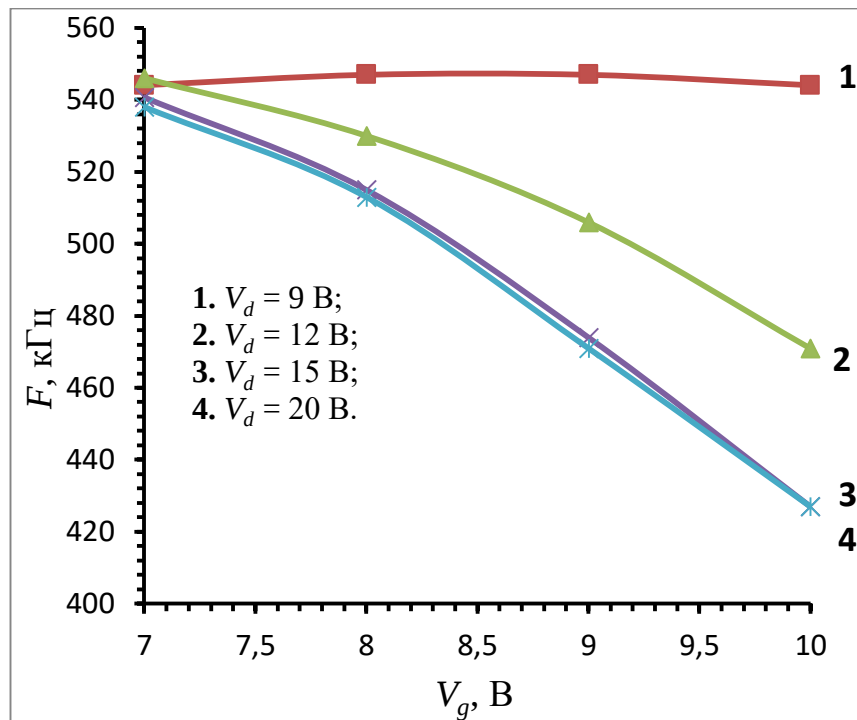


Рисунок 60 – Зависимость частоты электрических импульсов на выходе макета ДЧВ с ПДХ от электрических режимов работы ПДХ

Изменения частоты ДЧВ под воздействием магнитного поля отражено на рисунке 61. Измерения проводились с использованием источника постоянного магнитного поля с индукцией 50 мТл. Диапазон полученных значений магнитной чувствительности ДЧВ в исследуемых режимах составляет от 400 Гц/мТл при $V_d = 9$ В и $V_g = 7$ В до 2.2 кГц/мТл при $V_d = 20$ В и $V_g = 10$ В.

Таким образом, экспериментально полученные результаты измерения ДЧВ на основе бистабильного мультивибратора, использующего ПДХ в качестве чувствительного элемента, хорошо согласуются с результатами предварительного моделирования схемы в Multisim.

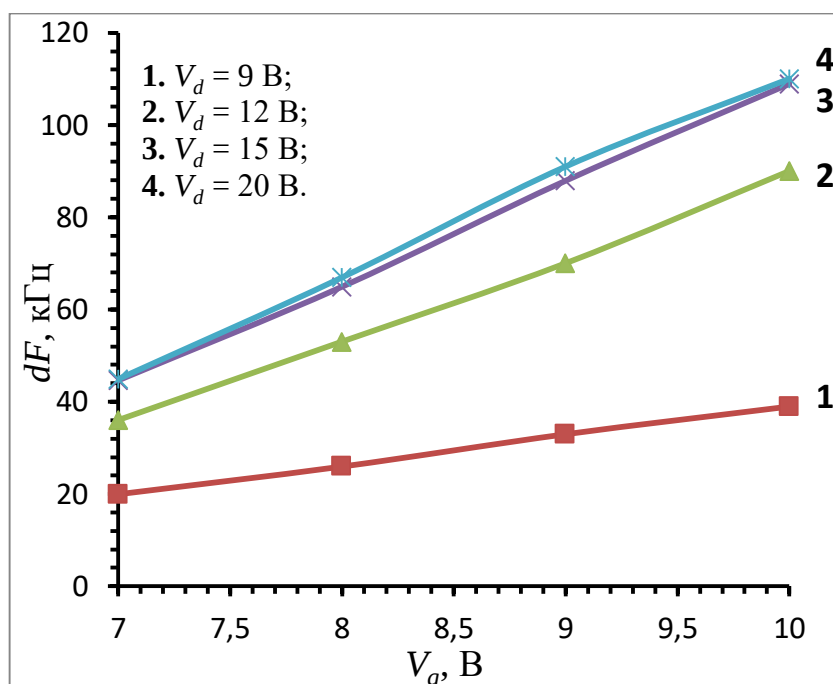


Рисунок 61 – Изменение частоты электрических импульсов макета магнитометрического ДЧВ при воздействии магнитного поля величиной $B=50$ мТл на ПДХ при различных электрических режимах работы ПДХ

Рисунок 62 демонстрирует линейность зависимостей изменения частоты ДЧВ при воздействии на ПДХ магнитного поля в диапазоне индукций 8-50 мТл. Линейность сохраняется при всех исследованных электрических режимах включения ПДХ.

Была исследована зависимость изменения частоты ДЧВ под воздействием магнитного поля dF от температуры T , приложенной к ПДХ. Полученные данные приведены на рисунке 63. Температурная чувствительность изменения частоты dF составляет около 350 Гц/°С в рабочем диапазоне потенциалов затворов ПДХ в диапазоне температур от -5 °С до 60 °С. Очевидно, такая зависимость обусловлена зависимостью индуцированного магнитным полем напряжения Холла V_H ПДХ от температуры. Изменение температуры в данном случае приводит к изменению величины подвижности носителей тока, количественно определяющую V_H [46].

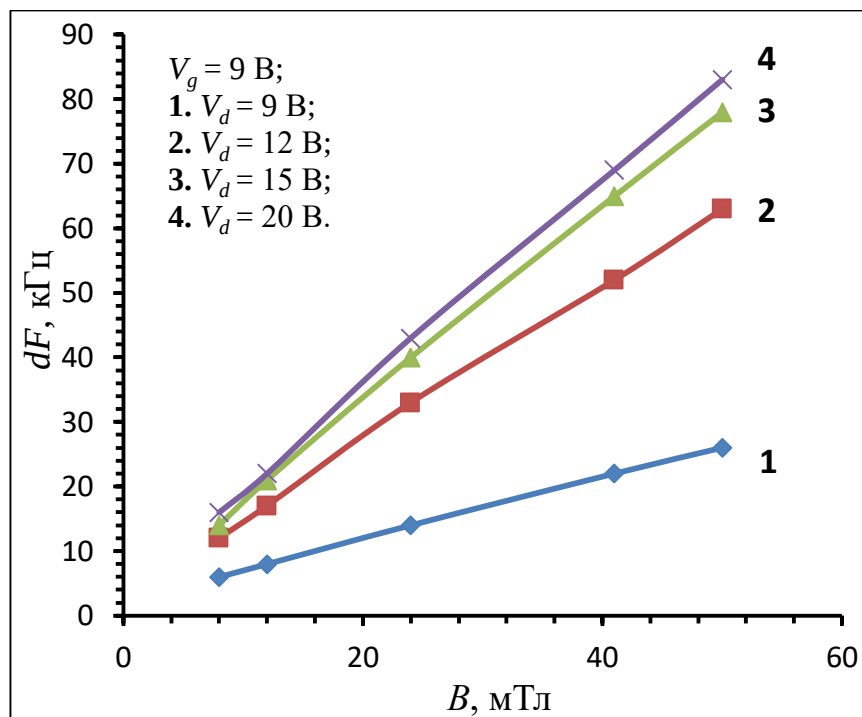


Рисунок 62 – Зависимость изменения частоты электрических импульсов на выходе ДЧВ от величины воздействующего на ПДХ магнитного поля при различных электрических режимах работы ПДХ

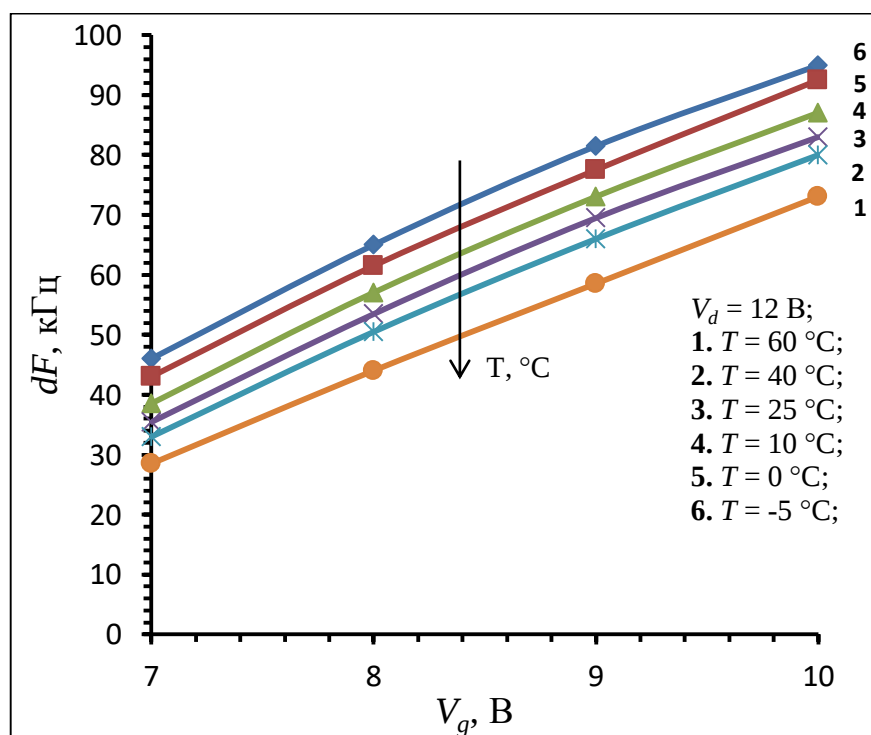


Рисунок 63 – Зависимость dF ДЧВ при изменении температуры ПДХ для различных электрических режимов работы ПДХ. Индукция магнитного поля $B=50 \text{ мТл}$

Среди особенностей ДЧВ на основе ПДХ и схемы мультивибратора можно отметить:

1. Электрическую развязку ПДХ и схемы мультивибратора, которая позволяет проводить моделирование измерений с помощью программ для моделирования и отладки электронных схем (например, Multisim).
2. Простоту схемы, отсутствие необходимости в использовании операционных усилителей для создания и поддержания частотного электрического сигнала на выходе ДЧВ.
3. Высокую крутизну управления рабочей частотой ДЧВ с помощью изменения потенциала затворов V_g (до 40 кГц/В в исследованных режимах для ДЧВ магнитного поля). Возможность расширения динамического диапазона и крутизны управления частотой ДЧВ на основе бистабильного мультивибратора (см. главу 6).
4. Высокую чувствительность к магнитному полю (до 2.2 кГц/мТл в исследованных режимах).

4.4 Выводы к главе

В главе приведены результаты исследования трех типов конструкций датчиков магнитного поля с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа (на примере использования полевого датчика Холла):

1. ДЧВ магнитного поля на основе скачков тока в канале ПДХ.
2. ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ, включенного в схему автогенератора.
3. ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ и схемы мультивибратора.

В основе функционирования первого типа датчика лежит особенность ВАХ ПДХ в области начала ударной ионизации. Она проявляется в виде появления скачков тока. Второй тип использует схему автогенератора на операционном усилителе, на входы которого включены холловские контакты ПДХ. Обратная связь по затворам ПДХ обеспечивает отклик частоты автогенератора на изменение индукции воздействующего магнитного поля. Третий тип построен на основе схемы мультивибратора, имеющим дополнительную цепь управления частотой, в которую оригинальным образом включен ПДХ.

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

В таблице 7 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).

Таблица 7 – Сравнения 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	Линейность преобразования магнитного поля в изменение частоты
На основе скачков тока в ПДХ	1	48	Нелинейно
На основе схемы автогенератора	7	25	Линейно
На основе схемы бистабильного мультивибратора	40	2200	Линейно

С практической точки зрения важно и то, что для создания и поддержания частотного электрического сигнала на выходе в ДЧВ со схемой бистабильного мультивибратора не используется усилитель, а функционирование обеспечивается при распространенных для современной микроэлектроники электрических режимах.

Глава 5. Датчики температуры и радиации с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа

В главе 3 на примере ПДХ было показано, что конструкция КНИ чувствительного элемента с МДПДМ полевой управляющей системой и боковыми холловскими измерительными контактами позволяет измерять не только магнитное поле, но и другие внешние воздействия, любым способом влияющие на поведение потока электронов в канале такого транзисторного элемента (например, температуру, ионизирующую радиацию и др). Таким образом, такой чувствительный элемент является универсальным и может быть использован для создания датчиков, способных регистрировать различные внешние воздействия.

В данной главе универсальность применения такого чувствительного элемента продемонстрирована на примере ДЧВ температуры и ДЧВ радиации. Чувствительные элементы корректно обозначить полевым датчиком температуры (ПДТ) и полевым датчиком ионизирующей радиации (ПДР).

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

5.1 Датчик температуры с частотным выходом с использованием ПДТ, включенного в схему автогенератора

Схема датчика приведена на рисунке 25. Возможность температурных измерений такого ДЧВ изучена при изменении температуры ПДТ от комнатной до 55 °С. В таблице 8 приведены

экспериментальные значения изменения частоты dF при воздействии температуры, а также оценки чувствительности S ДЧВ при различных значениях напряжения питания и потенциалов, поданных на затворы ПДТ [55,56].

Таблица 8 – Значения изменения рабочей частоты и чувствительности ДЧВ при изменении температуры ПДТ для различных значений напряжения питания и потенциалов на затворах ПДТ

$V_d, \text{В}$	$V_g, \text{В}$	$dT, ^\circ\text{C}$	$dF, \text{Гц}$	$S, \text{Гц}/^\circ\text{C}$
8	10	25	150	6
10	8	25	450	18

Из таблицы видно, что во втором режиме, соответствующем режиму насыщения тока канала ПДТ, величина чувствительности датчика в три раза выше, чем в первом, соответствующем линейному участку ВАХ. Таким образом, изменение напряжения питания и потенциалов, поданных на затворы ПДТ, позволяет изменять чувствительность датчика температуры с частотным выходом.

У рассмотренного подхода существуют следующие особенности:

1. Используется операционный усилитель для создания и поддержания устойчивых колебаний электрического сигнала на выходе.
2. Максимальная температурная чувствительность в исследованных режимах составляет около $18 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$.

5.2 Датчик температуры с частотным выходом на основе ПДТ и схемы мультивибратора

Как было показано в главе 3.2, чувствительный элемент типа ПДХ, помимо возможности регистрации воздействия магнитного поля, способен регистрировать изменение температуры, выступая в качестве регулируемого потенциалом затворов термотранзистора, что проиллюстрировано на рисунке 37. Это свойство использовано для создания ДЧВ температуры с использованием мультивибратора.

Схема разработанного и исследованного температурного ДЧВ на основе бистабильного мультивибратора с использованием ПДТ в качестве чувствительного элемента приведена на рисунке 64. Схема аналогична, той, что использовалась в ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ (раздел 4.3). В этой схеме ПДТ выступает в качестве термотранзистора и в совокупности с постоянным резистором R_{10} образует делитель напряжения V_{dt} . 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 R_{10} , потенциала на затворах V_g и рабочей температуры T ПДТ. При этом измерительные на боковых сторонах канала чувствительного элемента не используются.

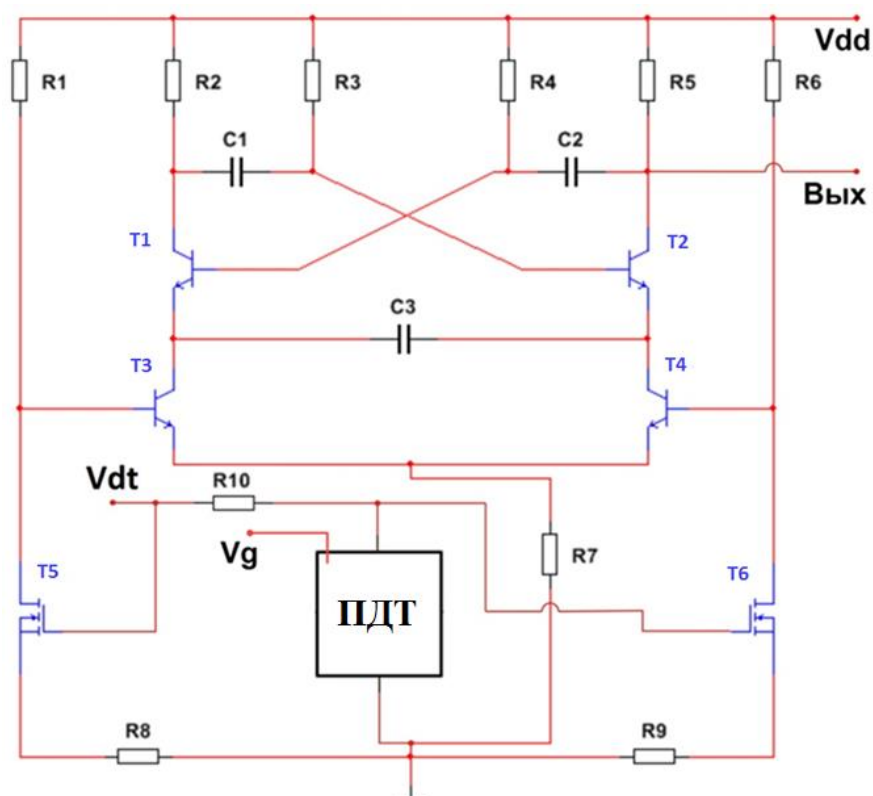


Рисунок 64 – Принципиальная схема температурного ДЧВ на основе ПДТ

На рисунках 65 и 66 представлены зависимости, характеризующие изменение частоты ДЧВ при изменении температуры. Из представленных зависимостей видно, что ПДТ позволяет с помощью изменения рабочего режима варьировать рабочую частоту ДЧВ. Зависимости, полученные в диапазоне температур от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ являются линейными. Значения температурных чувствительностей, соответствующих различным вариациям R_{10} , V_{dt} и V_g , приведены в таблице 9.

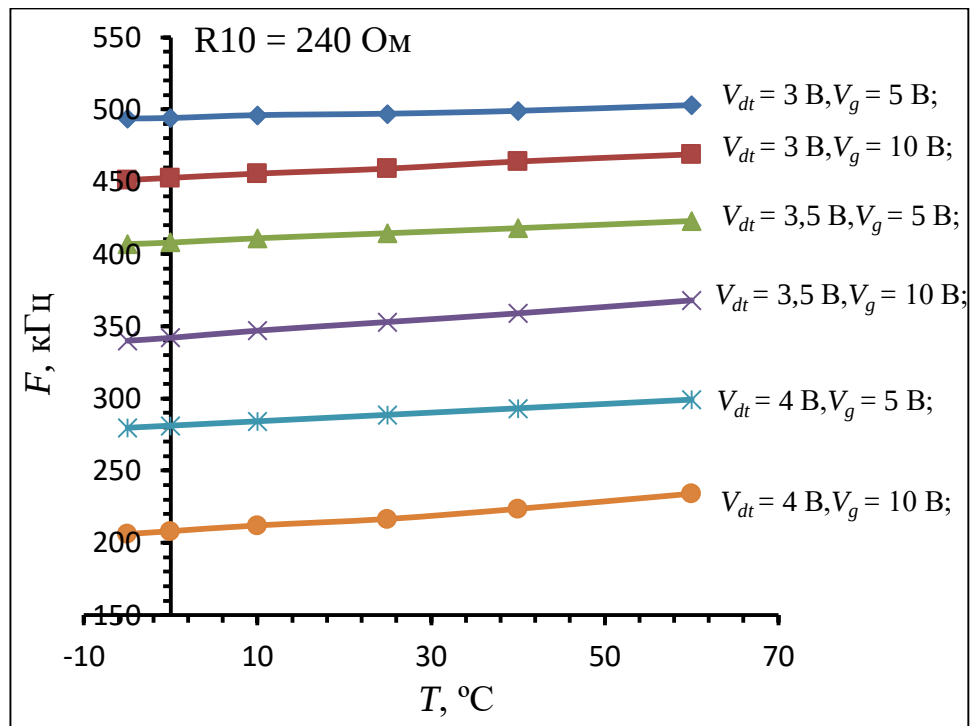


Рисунок 65 – Изменение частоты электрических импульсов на выходе температурного ДЧВ при изменении температуры ПДТ для различных электрических режимов ПДТ. Сопротивление $R_{10} = 240 \text{ Ом}$

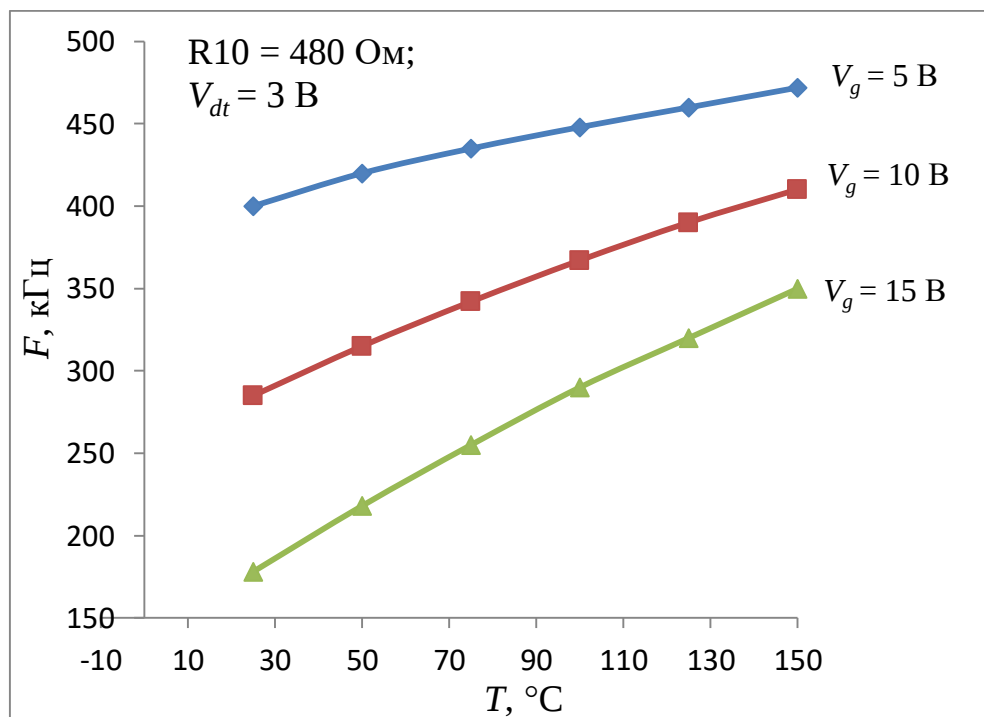


Рисунок 66 – Изменение частоты температурного ДЧВ при изменении температуры ПДТ для различных электрических режимов ПДТ. Сопротивление $R_{10} = 480 \text{ Ом}$

Таблица 9 – Значения температурных чувствительностей ДЧВ, соответствующих различным вариациям R_{10} , V_{dt} и V_g

R_{10} , Ом	V_{dt} , В	V_g , В	S , Гц/°С
240	3	5	140
		10	270
	3,5	5	240
		10	430
	4	5	300
		10	430
480	3	5	580
		10	1000
		15	1380

Таким образом, в экспериментах диапазон полученных значений чувствительности составлял от 140 Гц/°С до 430 Гц/°С при $R_{10} = 240$ Ом и от 580 Гц/°С до 1380 Гц/°С при $R_{10} = 480$ Ом.

Ключевые особенности датчика температуры с частотным выходом на основе ПДТ и схемы мультивибратора:

1. Простота конструкции и отсутствие необходимости в использовании операционных усилителей для создания и поддержания устойчивого частотного электрического сигнала на выходе ДЧВ.
2. Высокая чувствительность к изменению температуры (до 1380 Гц/°С в исследованных режимах).
3. Возможность отделить измерения температуры от воздействия магнитного поля вследствие использования для измерений температуры контактов стока и истока ПДТ. Схема может использоваться как мультисенсорное устройство с единственным чувствительным элементом (подробнее в главе 6). При этом результаты измерения температуры могут использоваться для калибровки ДЧВ магнитного поля согласно рисунку 63.

5.3 Датчик ионизирующей радиации с частотным выходом с использованием ПДР, включенного в цепь автогенератора

Возможность создания ДЧВ, регистрирующего радиационное ионизирующее излучение, на основе КНИ чувствительного элемента типа ПДР изучалось в схеме автогенераторного ДВЧ (рисунок 25). 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 10 приведены данные, характеризующие изменение частоты ДЧВ после облучения ПДХ. Изменение рабочей частоты ДЧВ объясняется тем, что облучение ПДХ сопровождается накоплением положительного заряда в подзатворных окислах SiO_2 и генерацией заряженных поверхностных состояний на границах раздела Si-SiO_2 [61]. Это вызывает перераспределение электрических полей в рабочем слое Si и изменение тока канала, что в конечном итоге приводит к изменению рабочей частоты ДЧВ. Из результатов, приведенных в таблице 10 также видно, что изменение потенциалов на затворах ПДР при измерениях способно увеличивать чувствительность к воздействию радиационного ионизирующего облучения более чем на порядок [55,56].

Таблица 10 – 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

5.4 Выводы к главе

Как было показано в главе 4 на примере ПДХ, КНИ чувствительный элемент транзисторного типа, обладающий МДПДМ полевой управляющей системой и функционирующий в режиме аккумуляции электронов на границах Si-SiO₂ помимо возможности регистрации магнитного поля способен выступать в качестве управляемого полем термотранзистора (полевой датчик температуры - ПДТ), а также сенсором других внешних воздействий (например, ионизирующей радиации – ПДР), способных изменять ток в канале. Эта особенность использована для изучения возможности создания датчиков температуры и ионизирующей радиации с частотным выходом на основе такого чувствительного элемента.

В главе изучены особенности двух типов конструкций датчиков температуры с частотным выходом на примере использования ПДТ в качестве чувствительного элемента:

1. ДЧВ температуры с использованием ПДТ, включенного в цепь автогенератора.

2. ДЧВ температуры на основе ПДТ и схемы мультивибратора

Определено, что конструкция датчика первого типа 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. Достоинством второй конструкции является независимость измерений температуры от влияния 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 1380 Гц/°С (на два порядка выше, чем у первого типа - около 18 Гц/°С).

В главе показана возможность использования КНИ чувствительного элемента транзисторного типа примере ПДР на для создания датчика ионизирующей радиации с частотным выходом. Для этого использовано включение ПДР в схему автогенератора на операционном усилителе. Чувствительность такого датчика может достигать 260 Гц/рад в зависимости от выбранного электрического режима работы ПДР.

Глава 6. Некоторые аспекты оптимизации характеристик и функциональных возможностей ДЧВ на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа и схемы мультивибратора

Как было показано в главах 4 и 5 ДЧВ на основе мультивибраторной схемы с практической точки зрения превосходит два других типа изученных конструкций ДЧВ. Имея более простую конструкцию, не требующую использования усилителей, она обеспечивает на порядок более высокую крутизну управления рабочей частотой с помощью выбора потенциала затворов КНИ чувствительного элемента, на два порядка более высокую чувствительность к магнитному полю и температуре.

В этой главе приводятся варианты оптимизации характеристик и функциональных возможностей ДЧВ на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа и мультивибраторной схемы:

1. Оптимизация за счет выбора элементной базы ДЧВ;
2. Оптимизация за счет универсальности чувствительного элемента.

6.1 Оптимизация за счет выбора элементной базы ДЧВ

На рисунке 67а приведена типовая зависимость выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах КНИ чувствительного элемента типа ПДХ, полученная с помощью моделирования схемы ДЧВ в программе для моделирования и отладки электронных схем Multisim. При моделировании ДЧВ в Multisim (раздел 4.3, рисунок 52) потенциалы затворов Т5 и Т6, входящих в цепи управления выходной частотой ДЧВ, V_{gT5} и V_{gT6} задаются при помощи двух источников питания V2 и V3, эмулирующих напряжения на Холловских контактах ПДХ при заданном режиме питания ПДХ. Расчетная зависимость на рисунке 67а разделена на области, которые соответствуют аналогичным областям рисунка 67б, на котором представлена

типовая передаточная характеристика МОП транзистора с индуцированным каналом. Область I соответствует подпороговому режиму работы транзисторов T5 и T6, область II соответствует линейному росту тока, а область III – области насыщения передаточной характеристики.

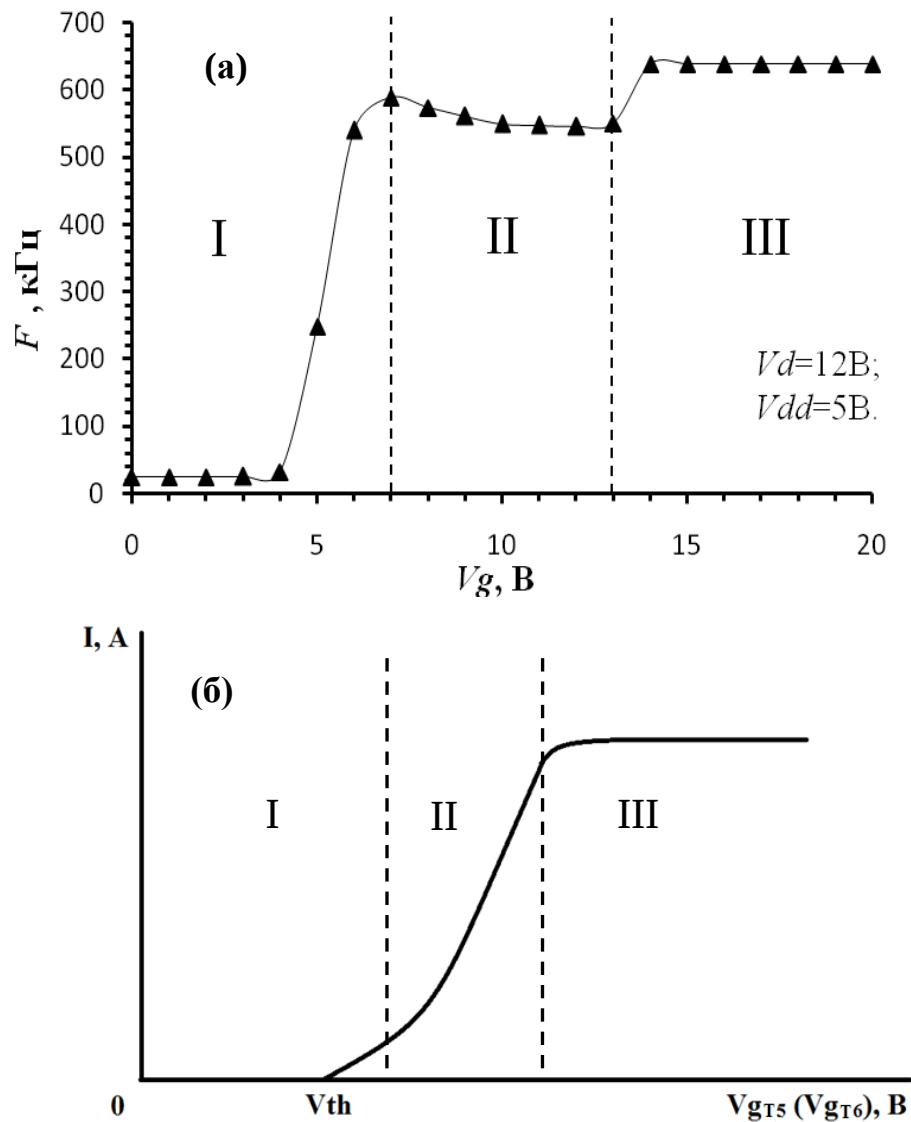


Рисунок 67 – Зависимость выходной частоты ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ от потенциала на затворах ПДХ: V_d – напряжение питания ДЧВ; V_{dd} – напряжение питания ПДХ (а) и типовая передаточная характеристика полевого транзистора с индуцированным каналом (б)

Область II является рабочей областью (см. разделы 4.3, 5.2) функционирования разработанного ДЧВ магнитного поля на основе ПДХ

[57]. Как видно из рисунка 67б, этой области соответствует зависимость тока транзисторов Т5 и Т6, а, следовательно, их внутреннего сопротивления, от напряжений на их затворах V_{gT5} и V_{gT6} . Наличие у КНИ чувствительных элементов типа ПДХ остаточной разности потенциалов на холловских контактах в отсутствии магнитного поля, зависящей от его электрического режима работы, определяет разность напряжений V_{gT5} и V_{gT6} , а, следовательно, и внутренних сопротивлений транзисторов Т5 и Т6 и «плеч» схемы ДЧВ, в состав которых они входят. Указанная особенность позволяет обеспечить возможность регулирования исходной частоты ДЧВ с помощью выбора электрического режима работы ПДХ. В области III внутренние сопротивления транзисторов Т5 и Т6 не зависят от напряжений на их затворах V_{gT5} и V_{gT6} , поэтому управление частотой ДЧВ таким образом, а также регистрация внешнего воздействия, невозможна.

Для практического применения важно определить возможности изменения диапазона управления рабочей областью (область II на рисунке 67а) разработанного ДЧВ с помощью изменения потенциалов затворов ПДХ, поскольку, как было показано в разделе 3.3, увеличение потенциала на затворах ПДХ позволяет достичь более высоких рабочих температур. При заданном напряжении питания V_{dd} схемы ДЧВ и заданных транзисторах мультивибратора Т1-Т4 изменения диапазона управления можно добиться выбором транзисторов Т5 и Т6 с необходимыми параметрами. Исходя из рисунка 67б, очевидно, что для смещения области II в сторону больших напряжений на затворах, необходимо, чтобы транзисторы Т5 и Т6 имели большее пороговое напряжение V_{th} . Это подтверждается рисунком 68, на котором приведены экспериментальные зависимости рабочей частоты ДЧВ от напряжения на затворе ПДХ в схеме измерения магнитного поля для двух пар транзисторов Т5 и Т6 с разным значением V_{th} . Для транзистора с $V_{th} = 2-4$ В (IRFD123) переход из области I в область II происходит заметно позднее, нежели для транзистора с $V_{th} = 1-2$ В (IRLD110). Можно заметить, что выбор

транзисторов T5 и T6 с более высоким V_{th} приводит одновременно к расширению области, соответственно, диапазон управления увеличивается.

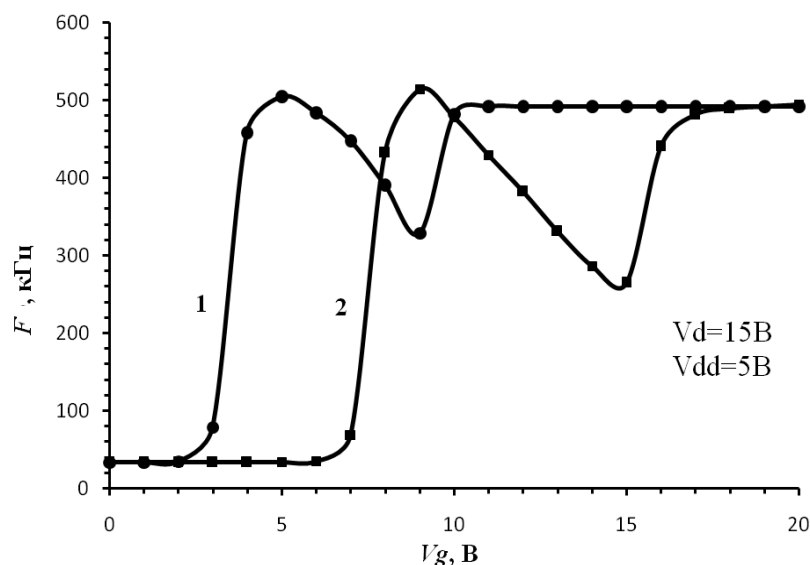


Рисунок 68 – Экспериментальные зависимости рабочей частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для двух пар транзисторов T5 и T6 с разными пороговыми напряжениями V_{th} : 1. IRLD110 ($V_{th} = 1-2$ В); 2. IRFD123 ($V_{th} = 2-4$ В)

Немаловажным является параметр крутизны преобразования выходной частоты с помощью изменения потенциала затворов ПДХ. С одной стороны, исходя из рисунка 67б, повышения крутизны можно достичь выбором транзисторов T5 и T6 с большей крутизной передаточной характеристики, что также положительно скажется и на чувствительности ДЧВ. С другой стороны повышения крутизны управления можно добиться при использовании резисторов R8 и R9 с отличающимися номиналами. На рисунке 69 приведены экспериментальные зависимости выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для трех различных соотношений сопротивлений R8 и R9. Из рисунка 69 можно определить, что крутизна преобразования в области II увеличилась как минимум в три раза – с 20 кГц/В до 60 кГц/В при увеличении сопротивления R9 на 62 Ом.

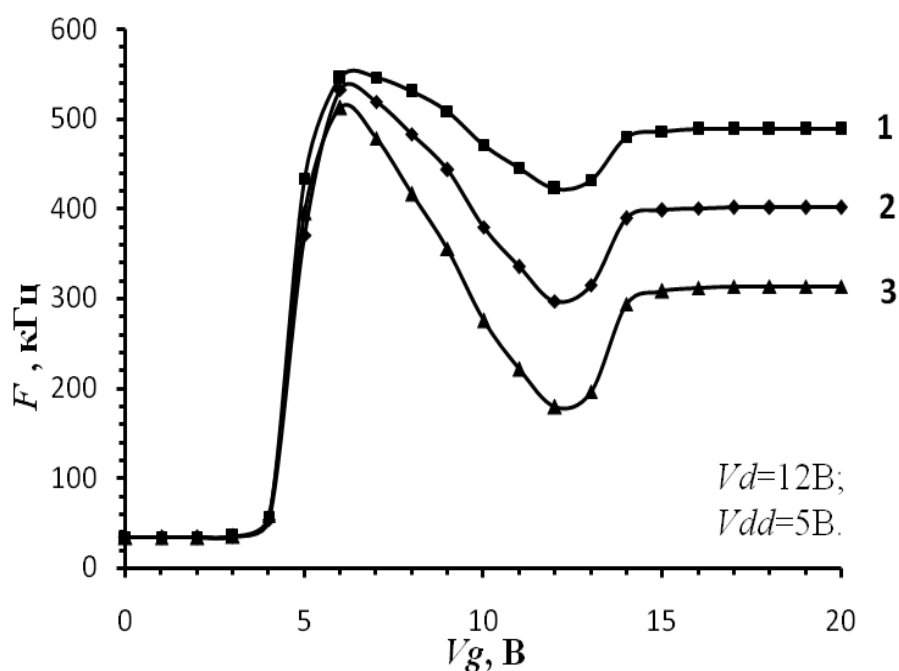


Рисунок 69 – Зависимости выходной частоты ДЧВ магнитного поля от потенциала на затворах ПДХ для трех различных соотношений сопротивлений R8 и R9: 1. Исходная – R8 = R9 = 3300 Ом; 2. R8 = 3300 Ом, R9 = 3336 Ом; 3. R8 = 3300 Ом, R9 = 3362 Ом

6.2 Расширения функциональных возможностей ДЧВ за счет универсального чувствительного элемента

Как было ранее показано (разделы 3.2, 4.3, 5.2), КНИ чувствительный элемент со встроенным аккумулярованным каналом, МДПДМ полевым управлением и дополнительными 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. Ниже предложена конструкция многофункционального датчика с частотным выходом на основе такого чувствительного элемента и мультивибраторной схемы.

Пример схемы сенсорного устройства для измерения температуры и магнитного поля приведен на рисунке 70. В этом случае чувствительный

элемент корректно называть полевым датчиком Холла и температуры (ПДХТ) Последовательное измерение различных по природе внешних воздействий может происходить с помощью перекоммутации цепи питания ПДХТ и контактов, обеспечивающих наличие потенциалов на затворах транзисторов T5 и T6. Кроме того, данные о температуре можно использовать для динамической калибровки датчика магнитного поля - температура оказывает влияние на преобразование магнитного поля в частоту согласно рисунку 63.

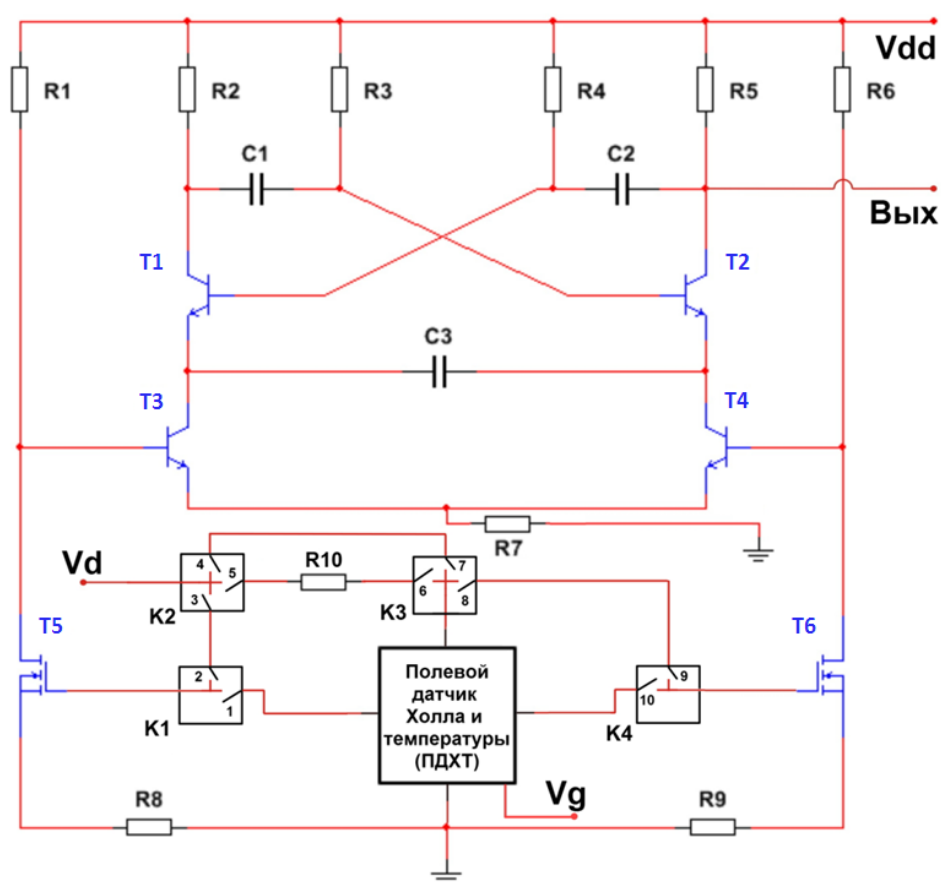


Рисунок 70 – Схема универсального датчика магнитного поля и температуры.

K1-K4 – 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

Стоит отметить, что в зависимости от специфики применения необходимое количество универсальных КНИ чувствительных элементов могут быть выведены отдельно и обслуживаться одной схемой ДЧВ поочередно (рисунок 71). Это осуществимо за счет возможности разделения по частоте функционирования чувствительного элемента в составе ДЧВ с помощью вариаций потенциала на затворах. Разделение измерений ряда чувствительных элементов по частоте можно также получить при использовании КНИ чувствительных элементов с рядом противоположных измерительных контактов на боковых сторонах канала. Такой чувствительный элемент содержит в своем составе набор управляемых электрическим полем элементов холловского типа и набор термотранзисторов.

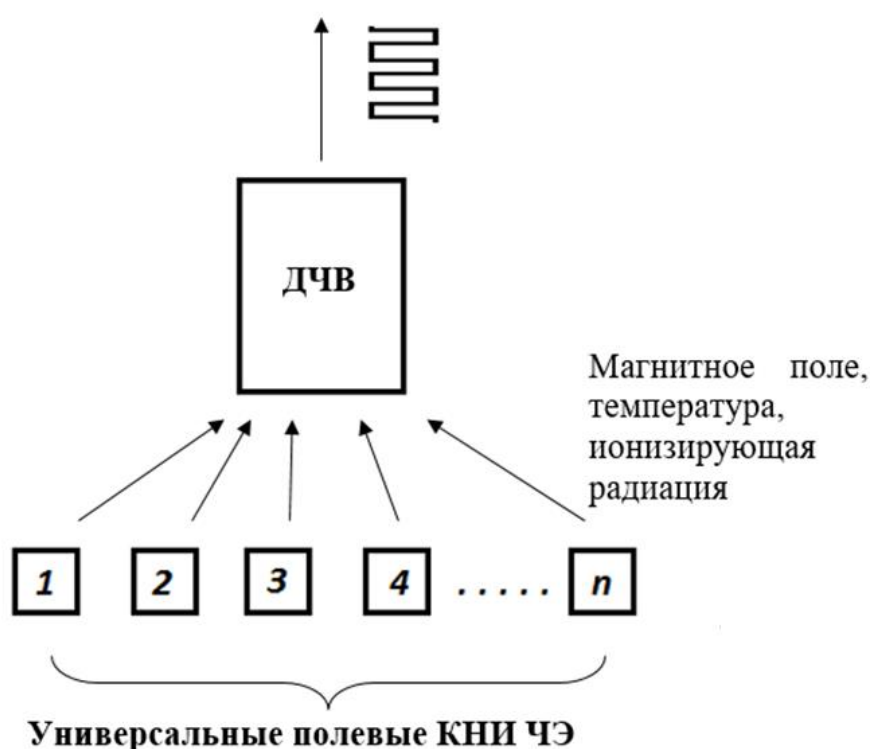


Рисунок 71 – Блок-схема, поясняющая возможность использования универсальных полевых КНИ чувствительных элементов для создания многодатчикового многофункционального ДЧВ

В работах [51-54] приводятся данные о возможности функционирования ПДХ в рекордно широком диапазоне температур – от гелиевых до, как минимум 330 °С, а анализ, проведенный в настоящей работе позволяет судить и о реальности существенно более высоких рабочих температурах. Такая особенность КНИ полевого чувствительного элемента может быть широко применима, например, в БСС, обслуживающих научные установки, установки бурения и геологии, низко- и высокотемпературные промышленные процессы и в других сферах, связанных с экстремальными для кремниевых микроэлектронных приборов температурными условиями. Исполнение чувствительного элемента по КНИ технологии позволяет использовать его также для разработки ДЧВ, обладающих повышенной радиационной стойкостью, и используемых в составе БСС, предназначенных для функционирования в системах космической бортовой электроники.

6.3 Выводы по главе

В предыдущих главах показаны достоинства датчиков магнитного поля и температуры с частотным выходом на основе КНИ чувствительного элемента транзисторного типа с МДПДМ полевой управляющей системой, использующих схему бистабильного мультивибратора с дополнительной цепью управления частотой.

В этой главе приведены способы оптимизации такой конструкции датчиков. Показано, что рабочая область ДЧВ определяется характеристиками транзисторов цепи управления частотой. Для изменения динамического диапазона управления частотой ДЧВ с помощью потенциала на затворах чувствительного элемента необходимо выбирать транзисторы цепи управления частотой с различными значениями порогового напряжения. Изменение порогового напряжения транзисторов с 1-2 В до 2-4 В сместило диапазон управления с 5-9 В до 9-15 В. Кроме того, показано, что

крутизну управления можно изменить с 20 кГц/В до 60 кГц/В, изменяя номиналы резисторов, входящих в цепь управления частотой.

Показано, что свойства универсального КНИ чувствительного элемента транзисторного типа с МДПДМ полевой управляющей системой, функционирующего в режиме аккумуляции электронов на границах Si-SiO₂, могут быть применены для создания многофункционального датчика с частотным выходом при использовании его совместно со схемой мультивибратора. Предложена конструкция ДЧВ, способного осуществлять последовательное измерение как минимум воздействия магнитного поля и изменения температуры. Предложена схема, мультисенсорного ДЧВ для использования в беспроводных сенсорных сетях.

Основные выводы работы

Основные выводы работы сводятся к следующему:

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 управление 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.

Приведенные выводы показывают, что поставленные задачи соответствуют цели работы и выполнены в полном объёме.

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.

Благодарность

Автор считает приятным долгом поблагодарить своего научного руководителя д.т.н. проф. В. Н. Мурашева за внимание к работе и полезные дискуссии, сотрудников кафедры ППЭиФПП НИТУ «МИСиС»: доцента к. ф.-м. н. С. И. Диденко и к. т. н. С. А. Леготина за внимание и поддержку, сотрудников ИПТМ РАН д. ф.-м. н. профессора В. Н. Мордковича, к. ф.-м. н. А. В. Леонова за помощь в проведении экспериментов и систематическое участие в обсуждении результатов, генерального директора М.И Павлюка и директора центра проектирования ИС АО «ПКК Миландр» М.И. Кокоулина за технологическую поддержку при разработке и изготовлении объектов исследования.

Список использованных источников

1. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение: Пер. с нем. М.: Мир, 1989. 196 с.
2. Fraden J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. Springer Science & Business Media, 2004. P. 589.
3. Jackson R. G. Novel sensors and sensing. CRC Press, 2004. P. 305.
4. Викулин И. М., Стафеев В. И. Полупроводниковые датчики. М.: Сов. радио, 1975. 105 с.
5. Егоров А. А. Систематика, принципы работы и области применения датчиков [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. Электронный журнал. 2009. №. 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar09/3/text.html> (дата обращения: 27.10.2016).
6. Волович Г. Интегральные датчики Холла // Совр. Электроника. СТА-ПРЕСС, 2004. №. 12. С. 26–31.
7. Вавилов В. Д., Кругликов П. Ф., Толочков Ю. А. Интегральные датчики давления. Конструкция и технология. Москва: МАИ, 2001. 48 с.
8. Schott C., Blyzniuk M. High volume production of magnetic sensors for the automotive market // Sensors. IEEE, 2012. P. 1–4.
9. Lynch J. P., Loh K. J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring // Shock and Vibration Digest. 2006. V. 38. №. 2. P. 91–130.
10. Красичков А. С., Аникин А. П. Система персонального мониторинга и дистанционной диагностики с возможностью подачи тревожного сигнала для контроля состояния здоровья пациента // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2011. №. 3. С. 35–44.
11. Milenković A., Otto C., Jovanov E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation // Computer communications. 2006. V. 29. №. 13. P. 2521–2533.

12. Кларк П., Лидер рынка MEMS делится ближайшими планами / перевод: Фурман И. [Электронный ресурс] // Время электроники. 2012. URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/doc/61210/> (дата обращения: 27.10.2016).
13. Рагозин Д. В. Моделирование синхронизированных сенсорных сетей // Пробл. програмув. 2008. № 2-3. С. 721–729.
14. Schmidt A. Analog Circuit Design in PD-SOI CMOS Technology for High Temperatures up to 400° C using Reverse Body Biasing (RBB): дис. Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften» Elektrotechnik und Informationstechnik, 2014. P. 193.
15. Wilde J. Hochtemperaturelektronik–Stand und Herausforderungen // Bericht der VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro-und Feinwerktechnik (GMM). 2002. P. 45.
16. Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мальцев П. П., Мокрушин А. Д., Мордкович В. Н., Омеляновская Н. М., Пажин Д. М. Полевой датчик Холла на основе структур «кремний-на-изоляторе» // Микросистемная техника. 2002. №. 10. С. 8–12.
17. Акимов А. Г., Барабаненков М. Ю., Мордкович В. Н. Управляемый резистор с функциями полевого транзистора и полевого датчика Холла // Приборы и техника эксперимента. 1988. №. 5. С. 123–128.
18. Леонов А. В. Полевой датчик Холла на основе структур "кремний на изоляторе": Дисс. канд. физ.-мат. наук. 26.12.2013 / ИПТМ РАН. Черноголовка, 2013. 112 с.
19. Mordkovich V. N., Pazhin D. M. Peculiarities of radiation defects formation in Si of SOI structures // Science and Technology of SOI Structures and Devices. Kiev: IOP publ., 2005. P. 60–61.
20. Colinge J. P. Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI. Springer Science & Business Media, 2004. P. 373.
21. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: a survey // Computer networks. 2002. V. 38. № 4. P. 393–422.

22. Вульвет Д. Датчики в цифровых системах: Пер. с англ. / под ред. Яроменка А. С. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.
23. Штанько А. А., Родионов В. А., Беринцев А. В., Гурин Н. Т., Новиков С. Г. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением на передаточной вольт-амперной характеристике // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6–1. С. 59–68.
24. Новиков С. Г., Гурин Н. Т., Беринцев А. В., Родионов В. А., Штанько А. А., Федоров И. С. Полупроводниковые приборы с S-образной передаточной вольт-амперной характеристикой // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 7. С. 52–56.
25. Касимов Ф. Д. Микроэлектронная негатроника—новое направление функциональной электроники // Микросистемная техника. Москва, 2003. Т. 4. С. 6–9.
26. Филинчук Н. А., Негатроника достижения и перспективы // Тр. Всесоюзной научно-технической конференции «Приборы с отрицательным сопротивлением и интегральные преобразователи на их основе». 1991. С. 11–17.
27. Орешкин П. Т., Глебов А. С., Петров И. М. Элементы и ячейки памяти на основе аморфных полупроводников // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1973. Т. 16, № 4. С. 81–86.
28. Коломиец Б. Т., Лебедев Э. А., Таксами И. А. Основные параметры переключателей на основе халькогенидных стеклообразных полупроводников // ФТП. 1969. № 5. С. 731–735.
29. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Магниточувствительные транзисторы. Обзор // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 1. С. 3–10.
30. Бабичев Г. Г., Гаврилюк Г. И., Зинченко Э. А., Козловский С. И., Романов В. А., Шаран Н. Н. Преобразователь давления с частотным выходом на основе однопереходных тензотранзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 3. С. 48–51.

31. Нинидзе Г. К., Павлюк С. П., Ищук Л. В., Кушнirenко В. В. Использование КНИ-транзистора в качестве генератора колебаний напряжения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 3. С. 54–57.
32. Садуллаев А. Б. Высокочувствительные многофункциональные датчики, работающие на основе автоколебаний тока в кремнии // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 27. С. 49–52.
33. Vikulin I. M., Lyuze L. L., Presnov V. A. Signal processing in devices of oscillistor type // Russian Physics Journal. 1968. V. 11. № 7. P. 82.
34. Дробот П. Н., Дробот Д. А. Осцилляторные сенсоры с частотным выходом // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: Межвузовский сборник. 2011. В. 1. С. 124–127.
35. Гасс К. В. Осцилляторные сенсоры температуры в космической электронике [Электронный ресурс]. Форум «Космическое приборостроение». Томск: ТПУ, 2013. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C22/048.pdf> (дата обращения: 27.10.2016).
36. Гасс К. В. Датчик магнитного поля с частотным выходом для криогенных температур [Электронный ресурс]. Форум «Космическое приборостроение». Томск: ТПУ, 2014. URL: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C22/048.pdf> (дата обращения: 27.10.2016).
37. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Oscillistor sensors of nonelectric quantities // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE, 2015. P. 1–4.
38. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Displacement sensors with frequency output based on helical instability // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2014. P. 1–4.
39. Осадчук В. С., Осадчук А. В. Методы построения микросистемных радиоизмерительных преобразователей с частотным принципом работы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 3. С. 26–33.

40. Касимов Ф. Д. Перспективы развития и применения микроэлектронной негатроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2003. № 5. С. 5–8.
41. 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.
42. Агеев О. А., Мамиконова В. М., Петров В. В., Котов В. Н., Негоденко О. Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин: учебное пособие // Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 155 с.
43. Мордкович В. Н. Структуры «кремний на изоляторе» перспективный материал микроэлектроники // Материалы электронной техники. 1998. № 2. С. 4–7.
44. 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.
45. Наумова О. В., Зайцева Э. Г., Фомин Б. И., Ильницкий М. А., Попов В. П., Зависимость подвижности электронов в режиме обогащения от их плотности в полностью обедняемых пленках кремний-на-изоляторе // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 10. С 1360–1365.
46. Popovic R. S. Hall effect devices. Second edition. CRC Press, 2003. P. 412
47. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х тт. 2-е изд. М.: Мир, 1984, 453 с.
48. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 2. Изд 2-е, доп. М.: ДМК Пресс, 2014. 888 с.
49. Бараночников, М. Л. Микромагнитоэлектроника Т. 1. М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.
50. Mordkovich V. N., Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Pazhin D. M., Karpushin M. P. Microsystem for micro- and small currents stabilization on the base of Field Effect Hall Sensor // 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (EMSA 2014). Vienna, Austria, 2014.

51. 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.
52. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. A magnetosensitive thin-film silicon Hall-type field-effect transistor with operating temperature range expanded up to 350 °C // *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42. № 1. P. 71–74.
53. Леонов А. В., Малых А. А., Мордкович В. Н., Павлюк М. И. Тонкопленочный кремниевый магниточувствительный полевой транзистор холловского типа с расширенным до 350 °С диапазоном рабочих температур // *Письма в Журнал Технической Физики*. 2016. Т. 42. № 2. С. 30–36.
54. 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 // *3rd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures “Saint Petersburg OPEN 2016”*. St Petersburg, Russia, March 28–30, 2016.
55. 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.
56. 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.
57. 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.

58. 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.
59. 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.
60. Leonov A. V., Malykh A. A., Mordkovich V. N., Pavlyuk M. I. An autogenerator induction-to-frequency converter circuit based on a field-effect Hall sensor with a regulated frequency // Instruments and Experimental Techniques. 2015. T. 58. № 5. С. 637–639.
61. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов Г. М. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 256 с.