

## НОВЫЙ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ – ПОЛЕВОЙ ДАТЧИК ХОЛЛА

*В.Н.Мордкович, М.Л.Бараночкиков,  
А.В.Леонов, А.Д.Мокрушин,  
Н.М.Омельяновская, Д.М.Пажин*

Хорошо известно, что магниточувствительные элементы обеспечивают возможность создания очень широкой номенклатуры контрольных и измерительных датчиковых систем и что одним из наиболее распространенных видов магниточувствительных элементов являются полупроводниковые датчики Холла (ДХ). Принцип их действия основан на эффекте Холла, т.е. на возникновении поперечной разности потенциалов в проводнике, по которому протекает электрический ток, при одновременном воздействии магнитного поля. Для изготовления ДХ широко используются полупроводниковые материалы типа Si, GaAs, InSb.

При всем разнообразии конструкций ДХ и технологий их изготовления все современные ДХ представляют собой пассивный регистратор внешнего воздействия, не обладающий свойствами внутреннего усиления полезного сигнала и управления характеристиками датчика. Нами разработан новый тип преобразователя магнитного поля – полевой датчик Холла на основе структуры «кремний на изоляторе» (КНИ ПДХ), который обеспечивает не только регистрацию магнитного сигнала, но и возможность управления его величиной, а также измерения в режимах цифровой и аналоговой модуляций.

Как известно, к основным параметрам ДХ относятся пороговая магнитная чувствительность, динамический диапазон магнитной чувствительности, энергопотребление, удельная магнитная чувствительность, диапазон рабочих температур, остаточное напряжение (т.е. напряжение на холловских контактах при протекании тока через ДХ при нулевом магнитном поле). Из общих физических соображений следует, что переход от кремния к КНИ-структуре позволяет улучшить каждый из этих параметров.

Пороговая магнитная чувствительность ДХ обратно пропорциональна толщине тела магниточувствительного элемента. Кремниевые ДХ обычно формируются по эпитаксиальной технологии, и толщина тела магниточувствительного элемента составляет несколько микрон. Характерная же толщина рабочего слоя кремния КНИ ПДХ составляет 0,2 мкм. Отсюда следует, что пороговая чувствительность КНИ ПДХ в десятки раз превосходит таковую у кремниевых ДХ.

Рабочий ток ДХ при постоянном напряжении питания определяется омическим сопротивлением тела магниточувствительного элемента. Из-за разницы толщин рабочих областей (~0,2 мкм для КНИ ПДХ и ~5 мкм для кремниевого аналога) сопротивление КНИ ПДХ гораздо больше, чем у кремниевых датчиков Холла. Поэтому при равных напряжениях питания рабочий ток КНИ ПДХ гораздо ниже, чем у кремниевого ДХ. Такое уменьшение тока, помимо выигрыша в энергопотреблении, обуславливает также уменьшение токового шума ПДХ и увеличение соотношения сигнал/шум.

Увеличение пороговой чувствительности КНИ ПДХ приводит к расширению динамического диапазона по сравнению с традиционными кремниевыми ДХ.

Высокая пороговая магнитная чувствительность и малый потребляемый ток определяют гораздо более высокую удельную магнитную чувствительность, т.е. крутизну функции преобразования КНИ ПДХ, которая представляет собой отношение величины ЭДС Холла к значениям магнитной индукции и тока через ДХ.

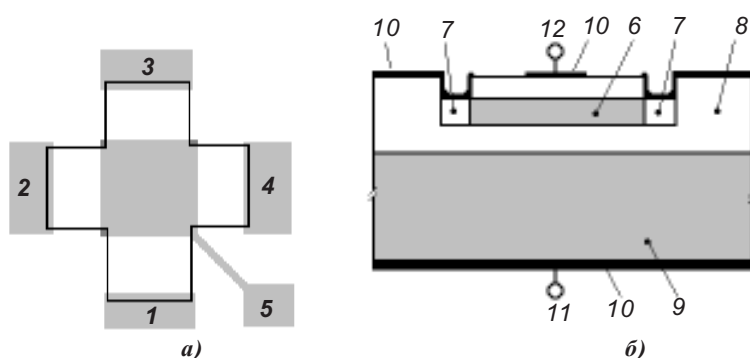
Верхний предел рабочей температуры кремниевых ДХ определяется токами утечки эпитаксиального р-п перехода, отделяющего тело магниточувствительного элемента от подложки. С увеличением темпера-

туры ток утечки быстро возрастает, и рабочая температура кремниевых датчиков Холла не превышает 100–120 °С. В КНИ ПДХ тело чувствительного элемента отделено от подложки скрытым диэлектриком, уменьшающим токи утечки в подложку на несколько порядков. В этом заключается причина значительного увеличения рабочей температуры КНИ ПДХ.

Величина остаточного напряжения ПДХ может быть значительно уменьшена благодаря выбору соответствующего потенциала на управляющих затворах.

Помимо отмеченных достоинств, КНИ ПДХ способен функционировать в условиях экстремальных радиационных полей. Известно, что ионизирующая радиация генерирует в теле магниточувствительного элемента избыточные носители заряда (электроны и дырки). Количество радиационно-индуцированных носителей в рабочем слое кремния КНИ ПДХ будет как минимум во столько же раз меньше, во сколько отличаются толщины рабочих областей ДХ и ПДХ. В этом и заключается физическая причина увеличения радиационной стойкости приборов при импульсных радиационных воздействиях. КНИ ПДХ обладает также повышенной устойчивостью и к стационарному ионизирующему облучению.

КНИ ПДХ (рис. 1) изготавливается на основе структур «кремний на изоляторе», в которых рабочий слой кремния отделен от подложки встроенным диэлектрическим слоем. В кремнии n-типа был сформирован слой скрытого оксида толщиной 400 мкм путем имплантации ионов кислорода и последующего отжига. Отсекаемый им слой кремния имел толщину 0,2 мкм. В нем был сформирован холловский крест из Si полосок длиной 80 и шириной 30 мкм. Для получения омических контактов прилегающие к концам полосок участки



**Рис. 1. Конструкция КНИ ПДХ:** а – вид сверху; 2, 4 – токовые электроды; 1, 3 – холловские электроды; 5 – электрод верхнего затвора; б – поперечное сечение: 6 – рабочий слой (n-Si); 7 – омические контакты (n<sup>+</sup>-Si); 8 – SiO<sub>2</sub>; 9 – подложка (n-Si); 10 – Al пленка; 11 – нижний затвор; 12 – верхний затвор

длиной 10 мкм были легированы фосфором до уровня  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. На поверхность креста была нанесена пленка пиролитического SiO<sub>2</sub> толщиной 100 нм, поверх которой был осажден Al (верхний затвор). Нижним затвором служила сама подложка с осажденной на ее поверхности пленкой Al.

Таким образом, в КНИ ПДХ конструктивно объединены возможности традиционного датчика Холла и двухзатворного полевого элемента типа металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл.

Наличие двухзатворной управляющей полевой системы определяет существенные дополнительные достоинства КНИ ПДХ – возможность создания широкого круга электронных схем регистрации и обработки полезного сигнала и возможность управления целым рядом характеристик, в том числе радиационной и температурной устойчивостью.

Типичные значения параметров КНИ ПДХ приведены в табл. 1. Сравнение данных таблицы с известными из литературы параметрами полупроводниковых ДХ показывает, что

Таблица 1

#### Основные характеристики КНИ ПДХ

Параметр	Значение
Размеры кристалла, мм	От 0,5 × 0,5 до 1,2 × 1,2
Магниточувствительная зона, мм	От 0,03 × 0,03 до 0,5 × 0,5
Режим работы	Постоянный ток, переменный ток, импульсный
Напряжение питания, В	3–12
Рабочий ток <sup>1</sup> , мА	0,1–0,4
Магнитная чувствительность <sup>1, 2</sup> , В/Тл	0,3–1,2
Удельная магнитная чувствительность <sup>1, 2</sup> , В/(А·Тл)	1000–10 000
Порог чувствительности <sup>3</sup> , нТл	40–100
Динамический диапазон магнитной чувствительности, Тл	$4 \cdot 10^{-8} \dots 5$
Линейность магнитной чувствительности в динамическом диапазоне, %	≤ 0,2
Диапазон частот, кГц	0–200
Диапазон температур <sup>4</sup> , °С	–270 ... +300
Температурный коэффициент магнитной чувствительности <sup>1</sup> , %/°С	–0,1 ... –0,4

*Примечание.* Значения параметра зависят от: <sup>1</sup> потенциала затворов; <sup>2</sup> размеров чувствительной зоны; <sup>3</sup> электрической схемы формирования выходного сигнала; <sup>4</sup> типа корпуса.

КНИ ПДХ не только превосходит кремниевые аналоги по основным параметрам, но и во многих случаях превосходит ДХ, выполненные на основе других полупроводниковых материалов (например, по рекордно малым значениям рабочего тока и рабочей температуре).

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость магниточувствительности КНИ ПДХ от температуры, измеренная в характерном для микроэлектронных элементов диапазоне (примерно от –40 °С до верхнего предела функционирования, который в нашем случае определяется конструкцией корпуса прибора, а не физическими ограничениями работоспособности).

Из рис. 2 видно, что ПДХ вполне работоспособен при 300 °С, тогда как верхний предел рабочей температуры для Si и GaAs ДХ составляет примерно 120 и 220 °С соответственно. Видно также, что с ростом температуры магниточувствительность ПДХ уменьшается. Однако, учитывая их исключительно высокую пороговую чувствительность (у ПДХ порог детектирования магнитного поля примерно на 2 порядка ниже значения магнитного поля Земли), это не должно быть сколько-нибудь существенным ограничением для использования ПДХ в высокотемпературных сенсорных устройствах. Более того, если сенсорная система должна функционировать в наиболее распространенном диапазоне магнитных полей, то оптимальный выбор концентрации носителей в слое Si КНИ структуры может обеспечить еще большее увеличение рабочей температуры ПДХ.

Помимо этого, температурная устойчивость магниточувствительности КНИ ПДХ может быть повышена путем подачи напряжения смещения на управляющие затворы (рис. 3).

Некоторые характеристики ДХ, в частности отношение сигнал/шум, можно улучшить, если использовать модуляционный режим измерений. В традиционных ДХ такой режим можно реализовать, если с помощью электронных ключей промодулировать ток, протекающий через датчик, и включить в измерительную цепь демодулятор. Однако использование электронных ключей вызывает появление трудноустраняемых коммутационных помех. В отличие от этого

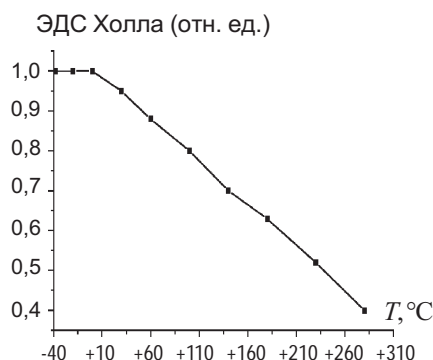


Рис. 2. Зависимость ЭДС Холла от температуры в единицах отношения величины измеряемого параметра к его значению при комнатной температуре

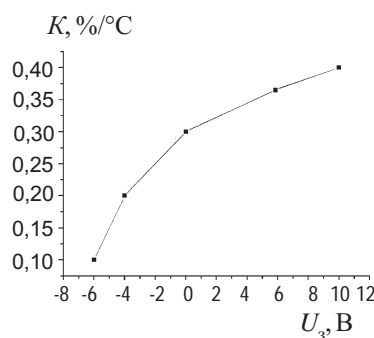


Рис. 3. Коэффициент температурной зависимости тока канала КНИ ПДХ как функция напряжения на управляющих затворах

Таблица 2

Уровень шумов КНИ ПДХ при различных частотах модуляции при ширине полосы пропускания 1 Гц

Показатель	Значение						
Уровень шумов, мкВ/Гц	30	10	3–4	1–1,2	0,25–0,3	0,13–0,18	0,01–0,013
Частота модуляции, Гц	1	10	100	1000	5000	10 000	100 000

Измерительная техника	Магнетометры Измерители тока Уровнемеры Счетчики оборотов
Автоматика и робототехника	Датчики положения, перемещения, вращения Датчики угол-код
Автомобильная электроника	Антиблокировочная система тормозов Система зажигания Датчик скорости Тахометр
Электротехника	Счетчики электроэнергии Бесколлекторные электромоторы
Дефектоскопия	Контроль качества металлических конструкций Контроль качества изоляции силовых кабелей
Высокотемпературные устройства	«Горячие» производства (химия, металлургия) Нефте- и газодобыча Геология Геофизика
Радиационно стойкие системы	Системы контроля для атомных электростанций Космическое оборудование
Системы безопасности	Электронные предохранители Детекторы магнитных источников

Рис. 4. Некоторые области применения полевых датчиков Холла

в КНИ ПДХ режим модуляции можно обеспечить, приложив к затворам переменное напряжение.

Табл. 2 иллюстрирует зависимость уровня шумов КНИ ПДХ от частоты модуляции напряжения на верхнем затворе, измеренную по способу синхронного детектирования. Именно такая, вытекающая из особенностей конструкции ПДХ, схемная возможность улучшить отношение сигнал/шум во многом определяет очень высокую пороговую чувствительность этих приборов. Основными достоинствами работы КНИ ПДХ в режиме модуляции являются:

- ✓ питание датчика постоянным током;
- ✓ отсутствие «ключей» и, соответственно, коммутационных помех;
- ✓ реализация максимальной пороговой чувствительности вследствие повышения отношения сигнал/шум.

Уникальное сочетание очень высокой магниточувствительности, высокой устойчивости к радиационным и температурным воздействиям и рекордно низкого энергопотребления определяет несомненную перспективность применения КНИ ПДХ в том числе в сенсорных устройствах, функционирующих в экстремальных условиях окружающей среды (рис. 4).

Широкие возможности применения ПДХ были подтверждены при создании макетов сенсорных устройств различного назначения. Среди них бесконтактные измерители электрического тока с порогом срабатывания от нескольких миллиампер, бесконтактные электронные предохранители для защиты электротехнических и электронных устройств от короткого замыкания и перегрузок, бесконтактные кнопочные ключи с пониженным энергопотреблением, устройство поддержания заданного уровня жидкости, счетчик оборотов шестерни, электронный компас и другие.

КНИ ПДХ, так же как и магниточувствительные измерительные системы, изготовленные по технологии КНИ, производятся на основе обычных технологических процессов микроэлектроники. Везде, где требуется точное измерение магнитного поля, ПДХ является экономичным и надежным решением. Легкость контроля за его работой позволяет без труда включать его в самые сложные контрольно-измерительные системы.