

# МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ДАТЧИКИ С РАСШИРЕННЫМ ФУНКЦИОНАЛОМ НА ОСНОВЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО КНИ МДПДМ-ТРАНЗИСТОРА СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ

М.Павлюк<sup>1</sup>

УДК 621.3.049.772.1.12  
БАК 05.27.00

Актуальными задачами развития микроэлектронных датчиков внешних воздействий являются повышение чувствительности, радиационной стойкости, расширение температурного диапазона измерений и снижение энергопотребления. Один из способов их решения – применение в качестве чувствительных элементов датчиков управляемых полем переменных резисторов, интегрированных в конструкцию тонкопленочных транзисторов со встроенным каналом. Такой подход позволяет расширить функционал датчиков за счет реализации новых схемотехнических решений. В статье рассмотрены преимущества и перспективы использования тонкопленочных полевых транзисторов со встроенным каналом, изготовленных по технологии кремний-на-изоляторе (КНИ), в качестве чувствительных элементов датчиков Холла и других типов датчиков.

**В** различных областях, где находят применение микроэлектронные устройства, широкое распространение получили так называемые параметрические (пассивные) датчики, в которых чувствительные элементы (ЧЭ), воспринимающие внешние воздействия, представляют собой полупроводниковые резисторы. К таким ЧЭ относятся, например, пьезорезисторы датчиков давления, фоторезисторы датчиков света, терморезисторы датчиков температуры, элементы Холла датчиков магнитного поля. Современные микроэлектронные датчики с пассивными резистивными ЧЭ представляют собой весьма сложные устройства, в которых ЧЭ лишь преобразует внешние воздействия в электрический сигнал и передает их

в схемы интерфейсной электроники, включающей усилители, стабилизаторы питания, устройства компенсации изменений температуры, АЦП, ЦАП и т.п. Именно интерфейсная электроника определяет электрические характеристики и потребительские свойства датчика, в частности чувствительность, диапазон рабочих температур, радиационную и температурную стойкость, энергопотребление, метрологические и интеллектуальные возможности.

Как показывает практика, существенное улучшение характеристик датчиков может быть достигнуто, если в качестве чувствительных элементов использовать активные, управляемые электрическим полем резистивные элементы, представляющие собой тонкопленочные полевые транзисторы со встроенным каналом, изготовленные по технологии КНИ. Активные ЧЭ такого типа позволяют, кроме того, расширить функционал дат-

<sup>1</sup> АО "ПКК Миландр", генеральный директор,  
тел.: +7 (495) 981-54-33 (доб. 331), mikhail@milandr.ru.

чиков благодаря новым схемотехническим решениям, обеспечивающим совершенствование характеристик без усложнения конструкции датчика.

В чувствительных элементах на основе КНИ-технологии канал транзистора формируется в тонком слое Si, отделенном от кремниевой подложки слоем диэлектрика SiO<sub>2</sub>, а сама подложка и слой SiO<sub>2</sub> используются как один из элементов полевого управления током канала. При этом на внешней поверхности слоя Si формируются пленка SiO<sub>2</sub> и МОП-система на фронтальной поверхности канала. Таким образом, чувствительный элемент на основе КНИ представляет собой тонкопленочный двухзатворный МДПДМ-транзистор, который обладает встроенным каналом в том случае, если области истока и стока имеют тот же тип проводимости, что и кремниевый канал.

КНИ-технология способна расширить функциональные возможности датчиков с резистивными чувствительными элементами вне зависимости от того, являются они пассивными омическими резисторами или резисторами, управляемыми электрическим полем. Так КНИ-технология автоматически обеспечивает чувствительным элементам повышение рабочей температуры и устойчивости к импульсным радиационным воздействиям. Это обусловлено тем, что тонкий слой Si, в котором формируется чувствительный элемент, отделен от подложки слоем SiO<sub>2</sub>, представляющим барьер для носителей тока, возникающих в подложке при повышении температуры или при импульсном облучении. Соответственно, сводится к минимуму влияние неравновесных носителей тока, созданных нагревом или облучением, на ток канала [1, 2]. Но интеграция в единой конструкции тонкопленочного КНИ-транзистора со встроенным каналом и традиционных пассивных резисторов, обеспечивающая возможность полевого управления характеристиками резистивных элементов, приводит к созданию микроэлектронных датчиков принципиально иного уровня функциональных возможностей и качества.

Прежде всего КНИ МДПДМ-транзистор со встроенным каналом можно использовать как нормально закрытый, так и как нормально открытый транзистор, что позволяет радикально улучшать основные характеристики датчиков (чувствительность, диапазон рабочих температур, радиационную стойкость, энергопотребление), выбирая электрические режимы работы транзистора. В качестве примера рассмотрим магнитно-чувствительный КНИ МДПДМ-транзистор хол-

ловского типа, назовем его полевым датчиком Холла (ПДХ). По сравнению с обычным КНИ МОП-транзистором конструкция ПДХ включает два противоположащих омических p<sup>+</sup>-контакта к боковым сторонам канала n<sup>+</sup>-p-n<sup>+</sup>-типа (рис.1).

Выбор электронного типа проводимости канала ПДХ обусловлен тем, что подвижность электронов в Si в несколько раз больше подвижности дырок, это пропорционально увеличивает ЭДС Холла по сравнению с каналом p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>-типа [3]. В зависимости от знака потенциалов на затворах МДПДМ-системы встроенный канал ПДХ может работать в режиме обогащения при положительном напряжении на затворах и в режиме обеднения – при отрицательном. В первом случае ПДХ содержит две области с повышенной концентрацией электронов вблизи интерфейсов SiO<sub>2</sub>-Si и представляет собой фактически два параллельно включенных транзистора, работающих в режиме обогащения и разделенных слоем Si с существенно меньшей концентрацией электронов (рис.2а). Во втором случае вблизи SiO<sub>2</sub>-Si-интерфейсов возникают области обеднения электронами, которые отделяют проводящий слой от границ с подзатворными окислами (рис.2б). Кроме того, в режиме обеднения ПДХ может функционировать как магнитотранзистор с расщепленным стоком при отключении питания от электрода стока и подключении его непосредственно к холловским контактам, которые в этом случае играют роль расщепленного стока (рис.2в). Мерой индукции магнитного поля в данном случае будет служить разность значений тока канала, измеренная между стоковыми контактами [3].

На рис.3 схематически показана теоретическая магнитно-передаточная характеристика ПДХ, иллюстрирующая зависимость ЭДС Холла от напряжения на затворах [4]. Для определенности рассматривается случай, когда оба затвора соединены между собой и к ним приложено одинаковое напряжение одного и того же знака. Как видно на графике, передаточные характе-

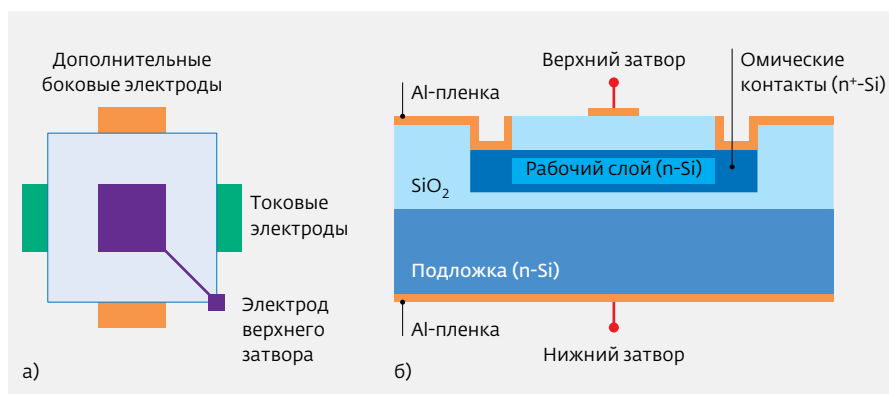
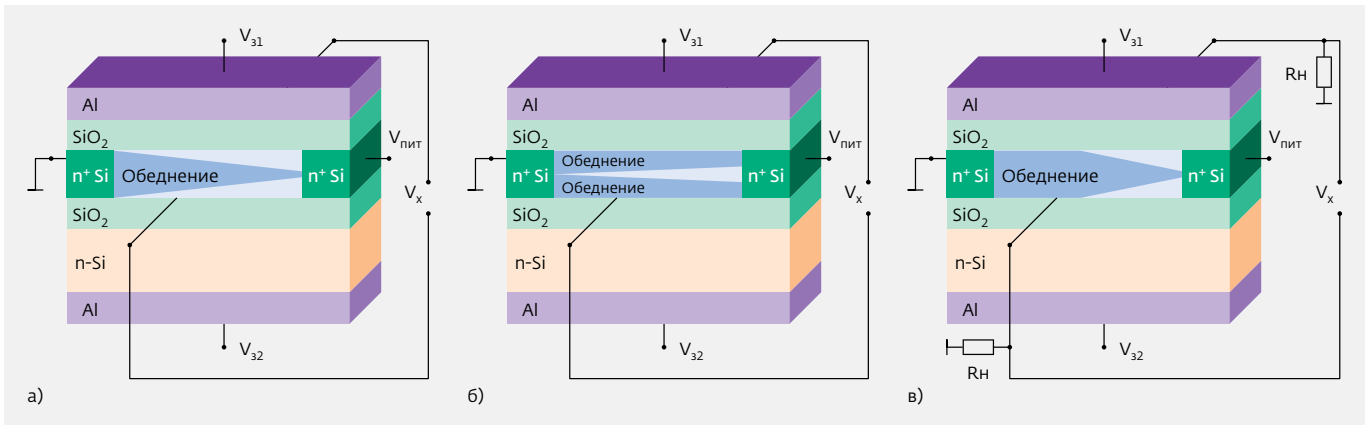


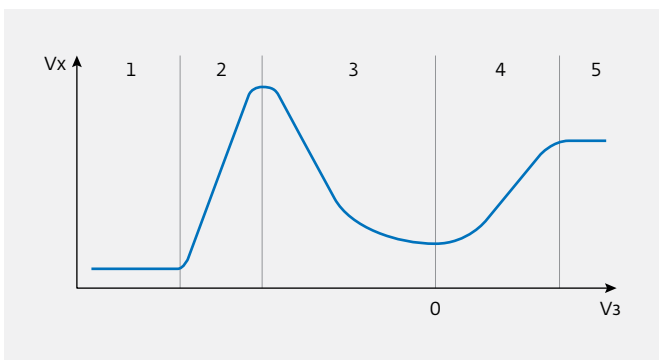
Рис.1. Конструкция КНИ ПДХ: а – вид сверху, б – поперечное сечение



**Рис.2.** Варианты конструкций ПДХ: а – ПДХ с обогащением у интерфейсов, б – ПДХ с обеднением у интерфейсов, в – ПДХ с расщепленным стоком

ристики для областей положительного и отрицательного напряжения на затворах резко отличаются одна от другой характером и формой зависимостей от величины напряжений. В случае ПДХ с аккумулярованными областями у интерфейсов характеристика имеет традиционный транзисторный вид (участок линейного роста с увеличением положительного напряжения переходит в участок насыщения), тогда как в области отрицательных потенциалов наблюдается пик магнитной чувствительности (см. рис.3).

В области отрицательного напряжения (ПДХ с обеднением у интерфейсов) при больших значениях напряжения две обедненные области смыкаются, ПДХ закрыт и через него протекает лишь небольшой подпороговый ток, которому соответствует слабый магнитно-индуцированный сигнал. По мере уменьшения отрицательного напряжения области обеднения утончаются, открывая ПДХ, и по каналу протекает ток тем больший, чем меньше отрицательное напряжение. Соответственно этому наблюдается рост ЭДС Холла, который, однако, заканчивается и сменяется уменьшением, когда зна-



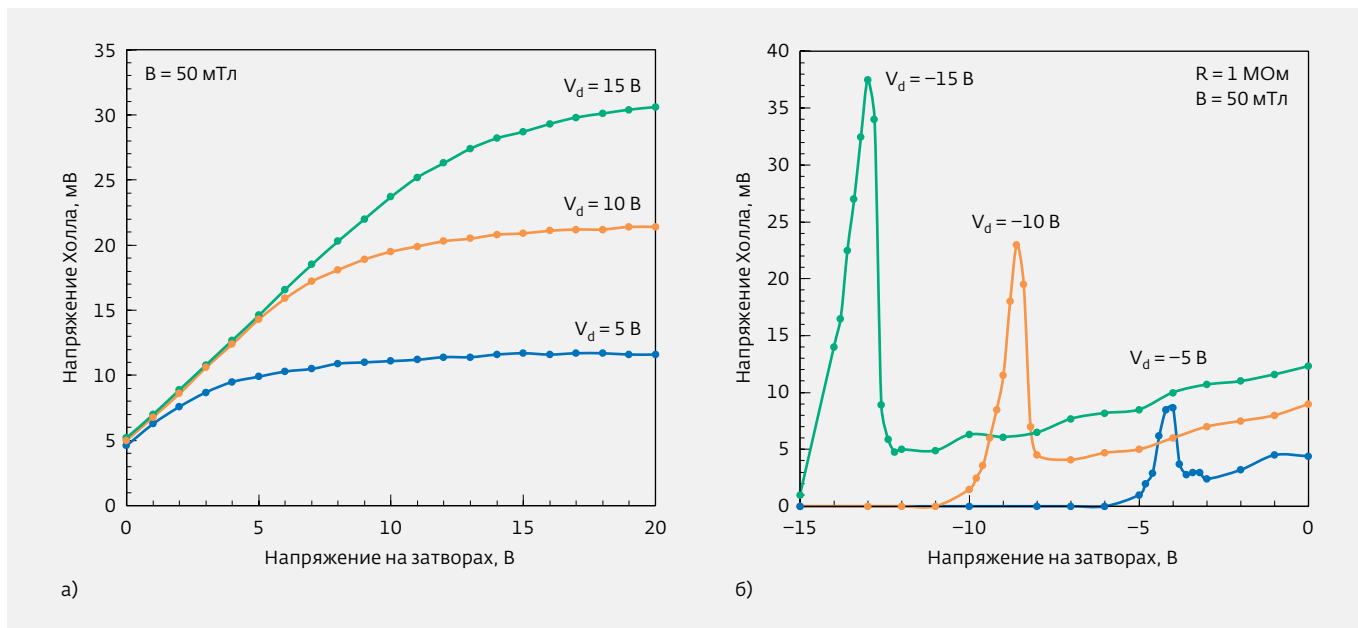
**Рис.3.** Качественная магнитно-передаточная характеристика ПДХ

чение отрицательного напряжения затвора становится сравнимым с положительным потенциалом плоских зон полевых систем SiO<sub>2</sub>-Si, имеющихся в ПДХ.

Экспериментальные передаточные характеристики (рис.4) подтверждают справедливость теоретической зависимости ЭДС Холла от напряжения на затворах (см. рис.3) и физико-математической модели ПДХ [4]. Наряду с этим они показывают, что значения ЭДС Холла зависят от номинала напряжения питания и в ПДХ, работающем в режиме аккумуляции электронов, и в ПДХ с обедненными электронами слоями вблизи интерфейсов (режим ПДХ с расщепленным стоком – частный случай режима обеднения, имеющий, как будет показано ниже, ряд достоинств). Из рис.4 видно, что величина ЭДС Холла в области пика магнитной чувствительности в ПДХ с обеднением заметно выше, чем в области насыщения магнитно-передаточной характеристики ПДХ в режиме аккумуляции.

Расчеты показывают, что амплитуду пика ЭДС Холла можно значительно увеличить, если повысить концентрацию доноров в канале ПДХ вплоть до значений порядка 10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> (рис.5). Дальнейшему повышению концентрации доноров будет сопутствовать уменьшение подвижности электронов [5] и, следовательно, уменьшение ЭДС Холла. В то же время ПДХ с аккумуляцией электронов обладает более широким диапазоном значений напряжений затворов, в пределах которого значение ЭДС Холла остается постоянным. Это обстоятельство – очевидное преимущество такого режима ПДХ при его использовании в сенсорных устройствах.

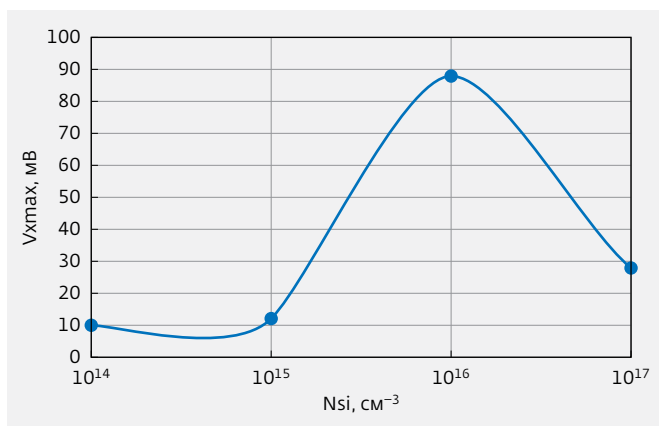
Другое достоинство ПДХ с обогащением – значительно более широкий диапазон рабочих температур по сравнению с элементами Холла на основе не только омических постоянных резисторов, но и в целом транзисторов на базе объемного Si и типа КНИ. В приборах на основе объемного Si максимальная рабочая темпе-



**Рис.4.** Типичные экспериментальные холловские передаточные характеристики ПДХ (индукция магнитного поля составляет 50 мТл): а – в режиме обогащения, б – в режиме расщепленного стока

ратура, как правило, находится в пределах 120–150 °С. Физически она ограничена токами утечки p-n-переходов и ростом концентрации электронов и дырок в Si при повышении температуры. В ПДХ p-n-переходы отсутствуют. При этом максимальная рабочая температура в ПДХ с обогащением определяется тем, что в слоях, обогащенных электронами, концентрация носителей составляет  $1-5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , благодаря чему проводимость обоих каналов ПДХ сохраняется постоянной вплоть до температур 500 °С [6, 7]. В то же время максимальная рабочая температура ПДХ с обеднением электронами

выше, чем в элементах Холла на объемном Si, несмотря на то, что в обоих случаях значения подвижности и характер ее температурной зависимости совпадают при равенстве концентрации доноров в канале. Это объясняется существенно меньшей толщиной канала ПДХ в режиме обогащения и, соответственно, увеличением плотности тока в канале, что и минимизирует влияние термогенерированных носителей тока на ЭДС Холла. Расчеты показывают, что в ПДХ с обеднением при концентрации носителей  $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , при которой объемная подвижность Si еще не уменьшается с ростом концентрации, максимальная рабочая температура составляет 300 °С, что примерно на 150 °С выше, чем у традиционных кремниевых элементов Холла.



**Рис.5.** Расчетная зависимость амплитуды пика ЭДС Холла в режиме обеднения от концентрации примеси в рабочем слое при напряжении питания 4 В (индукция магнитного поля составляет 50 мТл)

Таким образом, у ПДХ в режиме аккумуляции электронов расширение диапазона рабочих температур значительно больше, чем у ПДХ в режиме обеднения. Кроме того, только ПДХ с аккумуляцией способен нормально функционировать в условиях глубокого криогенного охлаждения при температурах меньше 20 К [6]. В этом случае атомы доноров в Si не ионизованы, электроны проводимости, источником которых при более высоких температурах служат доноры, отсутствуют, сопротивление кремниевого канала становится очень большим, ток через канал снижается до недопустимо малых значений и, как следствие, ПДХ с обеднением и традиционный элемент Холла неработоспособны. В отличие от них ПДХ с аккумуляцией функционирует за счет поступающих от источника питания электронов, которые под влиянием положительного напряжения на затворах

образуют проводящие ток области с низким сопротивлением в кремнии вблизи интерфейсов  $\text{SiO}_2\text{-Si}$ . Благодаря этому ПДХ с аккумуляцией не чувствителен к термогенерации носителей вплоть до весьма высоких температур.

Отмеченные особенности температурного диапазона ПДХ с аккумуляцией позволяют сделать важный для практического использования вывод. До сих пор принято считать, что в области высокотемпературных (порядка 300 °C и выше) сенсорных устройств монополия на чувствительные элементы принадлежит элементам Холла на основе полупроводниковых соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$ . Однако очевидно, что ПДХ с аккумуляцией, как чувствительный элемент датчиков магнитного поля, вполне конкурентоспособен с GaAs, InSb, GaN и их многослойными комбинациями. Кроме того, по физической сути ПДХ является тонкопленочным КНИ МДПДМ-транзистором со встроенным каналом и в этом качестве может быть использован как элемент инфраструктурной электроники датчиков. С точки зрения экономики производства устройства на основе ПДХ превосходят их аналоги на основе полупроводниковых соединений.

Определенные достоинства ПДХ по сравнению с пассивными резистивными кремниевыми элементами Холла связаны с наличием в его конструкции двухзатворной управляющей МДПДМ-системы, которая позволяет достаточно просто реализовать на основе ПДХ модуляционные режимы измерений, улучшающие характеристики датчиков и расширяющие их функционал. В частности, речь идет о модуляции тока канала путем подачи усиленного холловского сигнала на полевые затворы и последующего синхронного детектирования, что позволяет более чем на два порядка повысить отношение сигнал – шум и достичь порогового значения магнитной чувствительности ПДХ в пределах  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  Тл (против примерно  $10^{-4}$  Тл и  $10^{-3}$  Тл для ПДХ и кремниевого элемента Холла при стандартных измерениях с постоянным током канала) [8]. Кроме того, использование МДПДМ-системы для создания обратной связи с холловскими контактами в сочетании с обратной связью магнитно-индуцированного сигнала с выходом источника питания обеспечивает датчику интеллектуальную функцию самокомпенсации влияния изменений температуры окружающей среды и рабочего тока с точностью не хуже 1% [9].

О возможностях ПДХ как полезного элемента схемотехнических решений, используемых в сенсорных устройствах, свидетельствует, в частности, его применение в преобразователях магнитной индукции с частотным выходным сигналом [10]. При этом реализуются различные варианты датчика магнитного поля с частотным выходом: выбор ПДХ в качестве нелинейного элемента автогенератора, использование собственных

автоколебаний тока ПДХ на участке линейного умножения ВАХ и, наконец, применение ПДХ как элемента управления питанием мультивибратора [11]. Последний вариант представляется оптимальным, так как в этом случае датчик представляет собой предельно простую интегральную схему, обеспечивающую высокую магнитную чувствительность и не требующую при этом инструментального усилителя и АЦП. Схема состоит из ПДХ, транзисторов мультивибратора и двух транзисторов цепи питания мультивибратора, управляемых магнитно-индуцированным сигналом ПДХ (рис.6). При этом напряжением на затворах ПДХ можно варьировать значения основной рабочей частоты мультивибратора, то есть один и тот же датчик способен измерять магнитное поле на разных частотах (рис.7). Иначе говоря, такой датчик с частотным выходом весьма перспективен для использования в сенсорных сетях (в частности, в Интернете вещей). Чувствительность датчика к магнитному полю составляет примерно 2,2 кГц/мТл.

Другая особенность состоит в том, что в качестве всех транзисторов мультивибраторного датчика можно использовать тонкопленочные КНИ МДПДМ-транзисторы со встроенным обогащенным каналом, которые отличаются от ПДХ лишь существенно меньшими габаритами и отсутствием холловских контактов. Такой датчик может иметь чувствительность того же порядка, что и датчик с частотным выходом, описан-

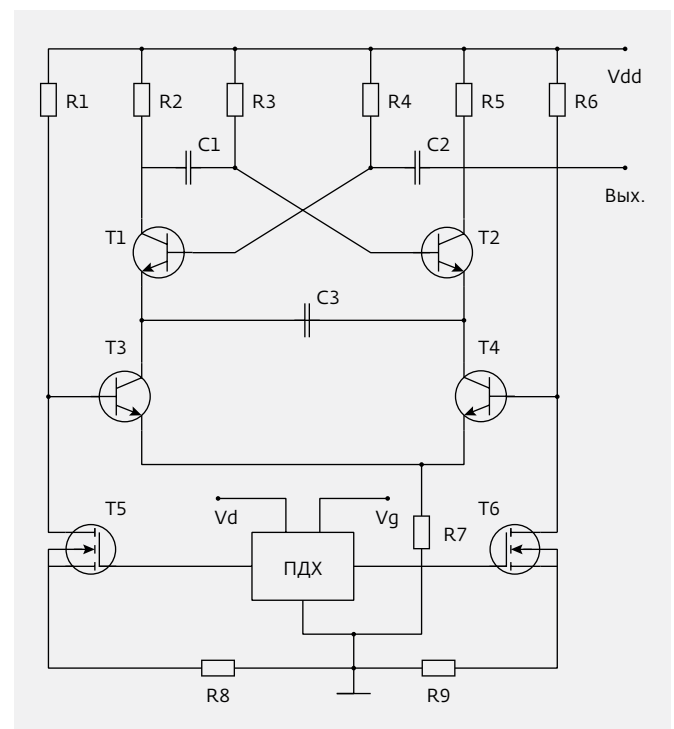


Рис.6. Функциональная схема мультивибраторного датчика с частотным выходом на основе ПДХ

ный выше. Диапазон рабочих частот может составлять от десятка кГц до, по крайней мере, 1 МГц.

КНИ ПДХ превосходят пассивные резистивные кремниевые элементы Холла и с точки зрения радиационной стойкости к разным видам облучения. В традиционных элементах Холла, изготавливаемых на основе массивных пластин монокристаллического кремния, изменения характеристик при облучении нейтронами, электронами и гамма-квантами обусловлены образованием заряженных радиационных дефектов структуры. В КНИ-элементах Холла в силу малой толщины приборного слоя Si электрические и упругие поля в системе SiO<sub>2</sub>-Si-SiO<sub>2</sub> радикально изменяют и замедляют кинетику образования радиационных дефектов в слое Si. В силу этого, например, аналогичные по величине изменения проводимости кремния, облученного нейтронами, в ПДХ возникают при дозе, примерно на 1,5 порядка большей, чем в дискретном элементе Холла из объемного Si при равном уровне исходной концентрации доноров [12].

В традиционных магнитных КМОП ИС, использующих пассивный Si-резистор в качестве чувствительного элемента, толщина резистора составляет 2–3 мкм [13], что примерно на два порядка меньше, чем в случае дискретного кремниевого элемента Холла. Поэтому в таких магнитных ИС кинетика образования радиационных дефектов в самом кремнии существенно замедляется, однако включается практически отсутствующий в дискретных

элементах Холла механизм радиационной деградации, связанный с накоплением радиационно-индуцированного положительного заряда в подзатворном диэлектрике SiO<sub>2</sub> и генерацией заряженных поверхностных состояний на границе SiO<sub>2</sub>-Si, существенно ухудшающий характеристики МОП-приборов [14].

Поскольку в ПДХ представлены две SiO<sub>2</sub>-Si системы, можно ожидать, что влияние радиации на такой прибор скажется сильнее, чем на обычный кремниевый МОП-транзистор. Однако это далеко не так. Прежде всего при отрицательном напряжении на затворах МДПДМ-системы подавляется накопление положительного заряда в обоих подзатворных диэлектриках, а образование обедненных областей у поверхности Si подавляет уменьшение подвижности в канале ПДХ за счет исключения возможности рассеяния на поверхностных состояниях. Благодаря этому в режиме обеднения ПДХ обладает очень высокой устойчивостью при воздействии корпускулярной и ионизирующей радиации. В частности, в [15] показано, что ПДХ в режиме обеднения выдерживает очень большие накопленные дозы ионизирующей радиации гамма-квантов Co<sup>60</sup> практически без изменения характеристик. Радиационную стойкость к гамма-облучению ПДХ в режиме обогащения можно также значительно повысить, если использовать режим измерений, при котором ПДХ определенное время находится под отрицательным напряжением, что обеспечивает

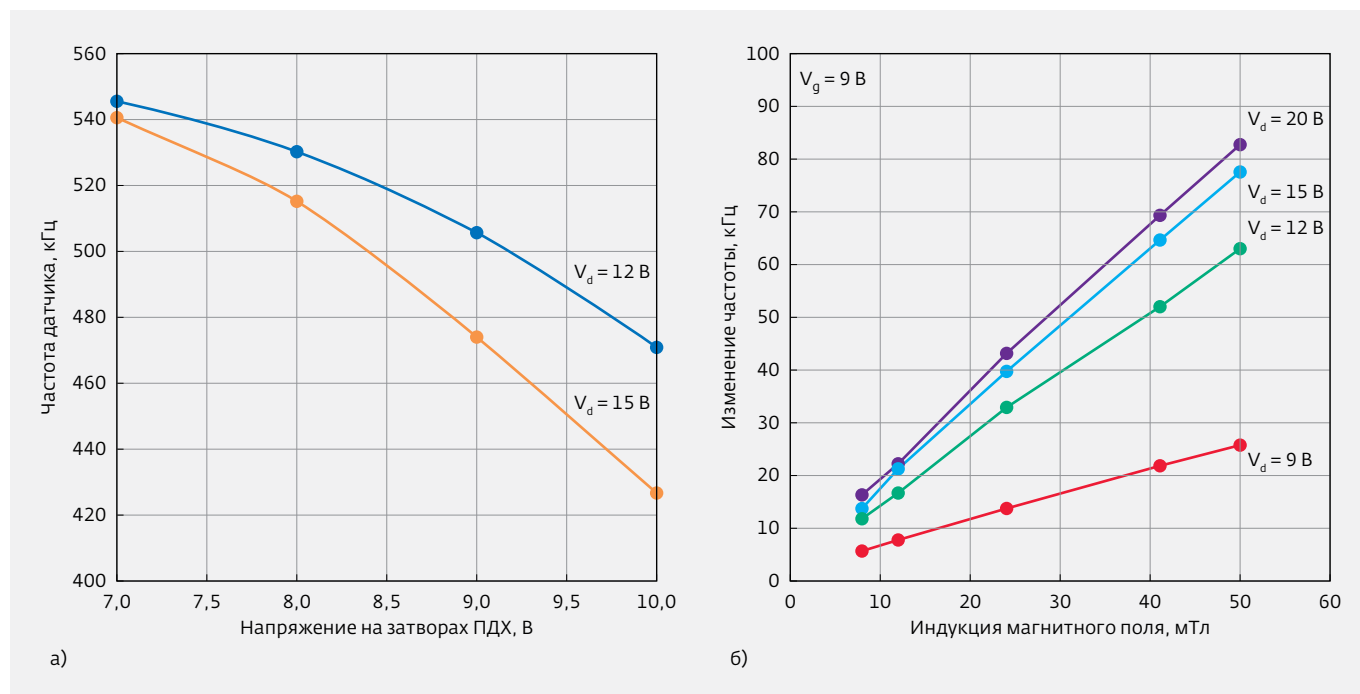


Рис.7. Мультивибраторный датчик с частотным выходом на основе ПДХ: а – зависимость рабочей частоты датчика от напряжения питания ПДХ и напряжения на его затворах, б – зависимость изменения рабочей частоты датчика от индукции воздействующего магнитного поля

высокую радиационную стойкость, а положительное напряжение подается на затворы только на время измерения. Такого типа режим работы сенсорных устройств используется, например, в космической электронике в целях экономии энергопотребления, причем характерное время закрытого и открытого для измерения состояния сенсоров составляет 1 с и 5 мс. Соответственно, при оценке влияния накопленной дозы ионизирующей радиации выигрыш в радиационной стойкости ПДХ, работающего в режиме обогащения, при схеме подачи питания и напряжения на затворы, предусматривающей изменение знака напряжения на затворах с отрицательного на положительный на момент измерения, составит около двух порядков величины по сравнению с обычным режимом ПДХ с обогащением.

Представленные в табл.1 данные позволяют оценить преимущества КНИ ПДХ в обоих режимах по сравнению с промышленно выпускаемыми дискретными элементами Холла зарубежного производства и возможности ПДХ конкурировать с такими же элементами на основе полупроводниковых соединений. Приводятся типичные значения промышленных элементов Холла по данным [16], где обобщена информация о более чем 300 дискретных элементах Холла отечественных и зарубежных фирм.

До сих пор достоинства тонкопленочных КНИ МДПДМ-транзисторов со встроенным каналом рас-

сматривались применительно к датчикам магнитного поля. Оценим возможности использования подобных чувствительных элементов в датчиках других внешних воздействий. Следует отметить, что конструкция ПДХ позволяет применять его как управляемый полем чувствительный элемент датчика температуры (ПДТ). В этом случае в качестве меры внешнего воздействия можно использовать измерения падения напряжения между контактами истока-стока КНИ-транзистора и любым из холловских контактов. Область применения полупроводниковых терморезисторов определяется диапазоном температур, в котором изменения его сопротивления связаны с изменениями подвижности носителей тока при постоянстве концентрации носителей. В случае кремниевых приборов обычно используют диапазон от  $-40$  до  $150$  °С, в котором подвижность при изменении температуры монотонно убывает по известному закону, а термогенерация электронов и дырок еще не влияет на концентрацию носителей. Как отмечалось выше, в КНИ ПДТ верхняя граница этого диапазона возрастает. При этом транзисторная природа ПДТ обеспечивает увеличение чувствительности по сравнению с кремниевыми терморезисторами. В табл.2 сравниваются характеристики КНИ ПДТ при их использовании в режимах обогащения и обеднения и широко используемого кремниевый термистора фирмы Honeywell (США).

**Таблица 1.** Сравнение характеристик ПДХ и типичных характеристик дискретных элементов Холла [16]

Тип элемента Холла	ПДХ			732SS21 Honeywell	2D-VD-11 Sentron AG	XSY-10 Siemens	SVB620 Siemens	P3A Asahi Kasel
	обогащение	обеднение	расщепленный сток					
Материал	КНИ	КНИ	КНИ	Si	Si	GaAs	InAs	AlGaAs/ InGaAs/ GaAs
Рабочий ток, мА	0,1-0,3	0,05-1	0,01-0,05	5	2	5	80	1
Чувствительность, В/Тл	0,1-0,5	0,05-3	0,2-1,5	0,35	0,45	0,8-1,2	0,6	0,4
Удельная чувствительность, В/(А · Тл)	200-1000	1000-6000	400-3000	80	80	170-230	8	380
Диапазон рабочих температур, °С	-50...350	-50...250	-50...250	0...70	0...70	-40...150	-20...160	-100...180

**Таблица 2.** Сравнение характеристик КНИ полевых датчиков температуры и кремниевого термистора фирмы Honeywell

Характеристика	Тип терморезистора	
	КНИ ПДТ, режим обогащения	TD4A Honeywell
Чувствительность, Ом/°С	50–100	8
Рабочий ток, мА	0,1–0,3	0,1
Диапазон температур, °С	–40...400	–40...150

Таким образом, конструкция ПДХ позволяет создать многофункциональный датчик, который одновременно с измерениями магнитной индукции позволяет контролировать температуру окружающей среды, используя один и тот же чувствительный элемент. В [11] показано, что датчик с частотным выходом на основе такого универсального ЧЭ обладает высокой чувствительностью и при магнитных и при температурных измерениях (2,2 кГц/мТл и 1,4 кГц/°С соответственно).

Следует отметить, что КНИ-технология широко используется при изготовлении пассивных резистивных чувствительных элементов датчиков давления благодаря достаточно простому способу изготовления мембранной конструкции. Для изготовления мембраны известными методами жидкостного или плазмохимического травления утончают подложку КНИ-структуры, а пьезорезисторы формируют в тонком слое Si, расположенном на слое скрытого диэлектрика [17]. В предельном случае область Si-подложки под пьезорезисторами может быть удалена полностью вплоть до слоя диэлектрика, что обеспечит возможность измерения рекордно малых давлений (тем меньших, чем тоньше скрытый слой Si в КНИ-структуре). Очевидно, что использование управляемого поля КНИ-резистора и в этой ситуации позволит повысить чувствительность датчиков давления, радиационную стойкость и расширить диапазон рабочих температур.

Известно, что обычные кремниевые фотоприемники не обладают чувствительностью в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. УФ-кванты поглощаются в тонком слое у поверхности кремния и не вносят ощутимого вклада в фотоотклик приборов из-за сильной поверхностной рекомбинации рожденных

светом электронов и дырок. Иное дело фотоприемники на основе КНИ-структур. В них толщина слоя Si может быть столь малой, что фотогенерация носителей тока в этих слоях будет обусловлена именно УФ-квантами (свет с большей длиной волны пройдет дальше через пленку диэлектрика и поглотится в подложке). Благодаря этому в КНИ-фотоприемниках максимум фоточувствительности приходится именно на УФ-область [18, 19]. Очевидно, что тонкопленочный КНИ-транзистор с полевым обеднением канала обеспечивает возможность создания высокочувствительного высокотемпературного УФ-фотоприемника с регулируемым полем диапазоном чувствительности в УФ-области. Следует подчеркнуть, что конструкция типа ПДХ и ПДТ, которая рассматривалась выше, по сути, представляет собой беспереходный (junction-less) транзистор, поскольку в таких датчиках p-n-переходы отсутствуют. В [20] теоретически показано, что определенный вариант двухзатворной конструкции такого транзистора способен обеспечить прибору чрезвычайно высокую способность обнаружения, а именно возможность детектировать световой поток порядка 35 фотон/с.

Перспективность использования тонкопленочных КНИ МДПДМ-транзисторов в биологии и медицине убедительно доказана не только большим объемом публикаций, но и разработкой и производством диагностических устройств. Конструктивно в таких транзисторных устройствах используется только одна МДП-система традиционного типа, образованная скрытым диэлектрическим слоем КНИ-структуры и ее кремниевой подложкой. Роль другого элемента полевого управления играет исследуемая проводящая биологически активная жидкость на поверхности подзатворного диэлектрика, касающаяся ее токового электрода (так называемый ионно-чувствительный затвор) [21, 22].

В заключение стоит отметить, что в тонкопленочном КНИ-транзисторе со встроенным каналом можно вместо МДПДМ-системы использовать вертикальные p-n-переходы. В [23] представлен такой магнитно-чувствительный транзистор холловского типа, в котором токовый канал n-типа отделен от скрытого слоя КНИ-структуры и пленки защитного окисла на его поверхности p<sup>+</sup>-областями. Это автоматически повышает радиационную стойкость элемента Холла из-за экранирования влияния на проводимость канала радиационно-индуцируемого заряда в пленках диэлектрика и заряженных поверхностных состояний на интерфейсах SiO<sub>2</sub>-Si. Одновременно с этим подавляется рассеяние электронов на поверхностных состояниях, что приводит к увеличению магнитной чувствительности. Отрицательное смещение p<sup>+</sup>-n-переходов позволяет повысить рабочую температуру и в зависимости



от уровня легирования Si-канала донорами довести ее примерно до 300 °С без потери чувствительности. Кроме того, в таких элементах Холла линии тока параллельны поверхности канала на всем его протяжении от истока к стоку, тогда как в МДПДМ-конструкции ширина области обогащения/обеднения в ПДХ изменяется по длине канала. Поэтому если р-п-вариант КНИ-элемента Холла содержит несколько противоположащих омических контактов на боковых сторонах канала, его удобно использовать в датчиках магнитного поля с частотным выходом [11], который обеспечивает многоканальные измерения. Датчики такого типа весьма перспективны для применения в распределенных сенсорных сетях и системах Интернета вещей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Colinge J.P.** Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI. – Springer Science & Business Media, 2004. P. 373.
2. **Громов Д.В., Мордкович В.Н., Пажин Д.М., Скоробогатов П.К.** Релаксационные эффекты в полевых датчиках Холла при воздействии импульса ионизирующего облучения // Электронная техника. 2011. Вып. 2 (226). С. 19.
3. **Popović R.S.** Hall effect devices. Second edition. – CRC Press, 2003. P. 412.
4. **Королев М.А., Павлюк М.И., Девликанова С.С.** Физическая модель полевого датчика Холла на основе КНИ структуры // Известия вузов. Электроника. 2017. № 2.
5. **Beadle W.E.** Quick reference manual for silicon integrated circuit technology. – John Wiley & Sons, 1985. 723 p.
6. **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. Vol. 120. P. 1197–1200.
7. **Леонов А.В., Малых А.А., Мордкович В.Н., Павлюк М.И.** Кремниевый полевой датчик холла с расширенным диапазоном рабочих температур // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 104–108.
8. **Varanochnikov M.L., Leonov A.V., Mordkovich V.N., Pazhin D.M., Filatov M.M.** Some Features of Magnetometric and Sensor Devices Based on the Field Effect Hall Sensor. – Advanced Electromagnetics Symposium. Proceedings, 2012. С. 455–459.
9. **Леонов А.В., Павлюк М.И.** Стабилизатор микро- и малых токов на основе полевого датчика Холла с функцией автокомпенсации влияния температуры // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 6. С. 34–36.
10. **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.
11. **Leonov A.V., Malykh A.A., Mordkovich V.N., Pavlyuk M.I.** Multifunctional sensor with frequency output based on SOI TFT double-gate sensing element. – 2<sup>nd</sup> International Conference on Sensors Engineering and Electronics Instrumental Advances (SEIA' 2016). 22–23 September 2016, Barcelona.
12. **Щербачев К.Д., Бублик В.Т., Мордкович В.Н., Пажин Д.М.** Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур "кремний на изоляторе" // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. № 6. С. 754–758.
13. **Маллер Р. Кейминс Т.** Элементы интегральных схем. – М.: Мир, 1989. С. 66–68.
14. **Чумаков А.И.** Действие космической радиации на ИС. – М.: Радио и связь, 2004. 320 с.
15. **Mokrushin A.D., Omeljanovskaja N.M., Leonov A.V., Mordkovich V.N., Pazhin D.M.** Radiation effects in SOI magnetic sensitive elements under different radiation conditions: Conference abstracts. – NATO Advanced Research Workshop Progress in semiconductor – on-insulator structures and devices operating at extreme conditions, Kyiv, 2000. P. 44–45.
16. **Бараночников М.Л.** Микромагнитоэлектроника. Т. 2 / Изд. 2-е, доп. – М.: ДМК Пресс, 2014, 888 с.
17. **Von Berg J., Sonderegger C., Bollhalder S., Cavalloni C.** Piezoresistive SOI-Pressure Sensor for High Pressure and high Temperature Applications // Proc. of. 12<sup>th</sup> Int. Conf. Sensor 2005, AMA Ser. GmbH. 2005. Vol. 12. P. 33–38.
18. **Muira N., Yamada H., Chiba T., Baba S.** Development of Silicon-on-Insulator (SOI) UV Sensor IC // Oki Technical Review. 2007. Vol. 74. № 3. P. 38–39.
19. **Yamada H., Miura N., Okihara M., Hinohara K.** A UV sensor IC based on SOI technology for UV care application // SICE Annual Conference. 2008. P. 317–320.
20. **Roudsari A.F., Saini S.S., Nixon O., Anantram M.P.** Junction-less phototransistor with nanowire channels, a modeling study // Optics express. 2014. Vol. 21. № 10. P. 12573–12582.
21. **Мальсагова К.А., Иванов Ю.Д., Плешакова Т.О., Козлов А.Ф. и др.** КНИ-нанопроволочный биосенсор для детекции белка d- $\alpha$ -1 // Биомедицинская химия. 2015. Т. 61. № 4. С. 462–467.
22. **Naumova O.V., Popov V.P., Safronov L.N., Fomin B.I. and others.** Ultra-thin SOI layer nanostructuring and nanowire transistor formation for femtomole electronic biosensors // ECS Transactions. 2009. Т. 25. № 10. С. 83–87.
23. **Goryachkin Yu., Odnolko A., Pavlyuk M., Svistunov A.** Hall integrated plate research and simulation // ARPN Journ. of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. P. 819–6608.