

УДК 621.315

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ  
НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ДАТЧИКА ХОЛЛА

© 2012 г. М. Л. Бараночников, А. В. Леонов, В. Н. Мордкович, Д. М. Пажин

*Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН  
Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Институтская, 6*

Поступила в редакцию 06.04.2012 г.

Рассмотрены возможности управления характеристиками полевых датчиков Холла на основе структур “кремний на изоляторе”, конструкция которых содержит полевую систему типа “металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл” (м.д.п.д.м.). Регулировка потенциала затворов позволяет обеспечить компенсацию остаточного напряжения, уменьшение коэффициента температурной зависимости магниточувствительности, минимизацию радиационных эффектов, управление величиной и динамическим диапазоном магниточувствительности, стабилизацию рабочего тока. Применение структур м.д.п.д.м. в измерениях магнитного поля позволяет осуществить преобразование типа индукция–частота с возможностью в широких пределах изменять рабочую частоту преобразователя; улучшить отношение сигнал/шум путем затворного модулирования тока канала; использовать полевой датчик Холла в качестве смесителя в гетеродинной схеме измерения индукции и частоты переменных магнитных полей; улучшить характеристики и считывание информации в многоэлементных преобразователях магнитного поля на основе полевого датчика Холла.

## ВВЕДЕНИЕ

Полевой датчик Холла (п.д.Х.) представляет собой магниточувствительный элемент, сочетающий возможности традиционного элемента Холла и полевого транзистора со встроенным каналом и управляющей системой типа “металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл” (м.д.п.д.м.) [1, 2].

Полевой датчик Холла изготавливается на основе структур “кремний на изоляторе”, в которых тонкий слой кремния отделен от кремниевой подложки слоем диэлектрика  $\text{SiO}_2$ . Подложка, на поверхности которой сформирован металлический электрод, и слой скрытого диэлектрика используются в качестве одной из м.д.п. полевых систем. Другая полевая система имеет традиционную конструкцию. Она включает в себя слой кремния структуры “кремний на изоляторе”, пленку  $\text{SiO}_2$  на его поверхности и электрод затвора на внешней поверхности пленки  $\text{SiO}_2$ .

В отсеченном от подложки слое кремния формируется  $n^+ - n - n^+$ -канал, толщина которого ( $\sim 0.2$  мкм) и уровень легирования  $n$ -области ( $\sim 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) таковы, что в канале существует гальваническая связь обеих управляющих систем. Благодаря этому свойства области пространственного заряда, создаваемой одной из м.д.п.-систем вблизи соответствующего интерфейса, можно изменять, варьируя потенциал затвора другой м.д.п.-системы. Таким образом, ток канала и, следовательно, э.д.с. Холла зависят от знака и величины потен-

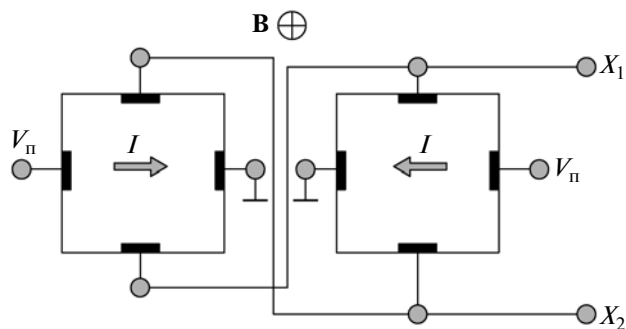
циала обоих затворов м.д.п.д.м.-системы, т.е. от режимов их подключения к источнику питания [3].

Сама по себе конструкция на основе структуры “кремний на изоляторе” обуславливает улучшение характеристик п.д.Х. по сравнению с традиционными кремниевыми элементами Холла. Полевым датчикам Холла свойственны более высокая магниточувствительность, способность функционировать в широком диапазоне рабочих температур (от температуры жидкого гелия до, по крайней мере,  $300\text{--}350^\circ\text{C}$ ), повышенная устойчивость к стационарному нейтронному и импульсному ионизирующему облучению, существенное снижение энергопотребления (рабочий ток  $0.2\text{--}0.4$  мА), высокая удельная магниточувствительность ( $10^3\text{--}10^4 \text{ В}/(\text{А} \cdot \text{Тл})$ ) [1–6].

В то же время необходимо подчеркнуть, что возможность выбора режимов смещения управляющих затворов и применения нетрадиционных схем обработки холловского сигнала с использованием м.д.п.д.м.-системы также позволяет существенно улучшить магнитометрические возможности п.д.Х. и аппаратуры на его основе при расширении области их применения. Цель данной статьи состоит в том, чтобы проиллюстрировать возможности п.д.Х. на конкретных примерах.

КОМПЕНСАЦИЯ ОСТАТОЧНОГО  
НАПРЯЖЕНИЯ

Остаточное напряжение  $E_{\text{ост}}$  в элементах Холла — это напряжение между холловскими контактами, возникающее при протекании тока в отсут-



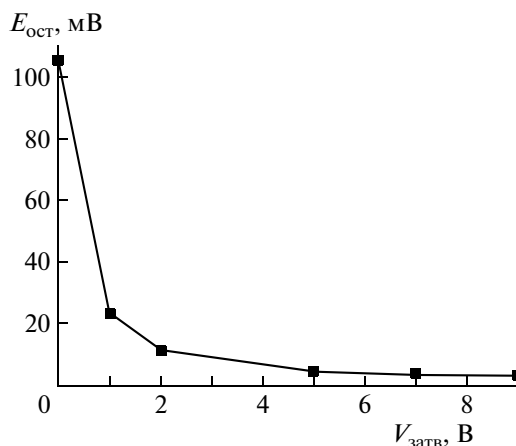
**Рис. 1.** Компенсация  $E_{ост}$  в двухэлементной конструкции элемента Холла.  $V_{п}$  – напряжение питания;  $X_1, X_2$  – электроды Холла;  $I$  – направление тока, протекающего по каналу магниточувствительных элементов.

ствие магнитного поля. При современном уровне технологии микроэлектроники основной причиной, вызывающей появление  $E_{ост}$ , являются упругие напряжения, возникающие в холловском кристалле, содержащем области различных по механическим свойствам материалов. В п.д.Х. это слой кремния, два диэлектрических слоя, кремниевая подложка, материал внешнего затвора (в нашем случае поликристаллический кремний), металлические электроды затворов и токовые дорожки. Существенную роль играют и материалы, используемые в конструкции корпуса, и термические режимы монтажа кристалла в корпусе [7]. Характерные значения  $E_{ост}$  в п.д.Х. составляют 5–10 мВ, что затрудняет точные измерения слабых магнитных полей (порядка единиц миллitesла при измерении индукции постоянного магнитного поля).

Известны несколько способов уменьшения величины  $E_{ост}$ . Наиболее распространен метод вращения тока (spinning current), состоящий в периодическом изменении направления тока в элементе Холла в процессе измерения с помощью специальной электронной схемы [8]. При этом в суммарном сигнале каждой пары измерений остаточное напряжение вычитается, а холловский сигнал удваивается.

Данный метод обеспечивает существенное подавление  $E_{ост}$ , однако он усложняет обрабатываемую электронику. Кроме того, метод применим только к элементам Холла, геометрия которых инвариантна к повороту на  $90^\circ$  (квадрат, крест), тогда как во многих практических случаях целесообразно использовать элементы другой формы, например прямоугольной, обеспечивающей при прочих равных условиях возможность увеличения крутизны холловского сигнала.

Простой способ минимизации  $E_{ост}$ , позволяющий исключить дополнительный блок обрабатываемой электроники и снять ограничения на



**Рис. 2.** Зависимость  $E_{ост}$  от напряжения на верхнем затворе п.д.Х. Напряжение на нижнем затворе п.д.Х. отсутствует.

форму кристалла, предполагает двухэлементную конструкцию элемента Холла и их параллельное соединение таким образом, чтобы  $E_{ост}$  были разнонаправлены и подавляли друг друга, не внося вклада в результирующий сигнал (рис. 1) [9].

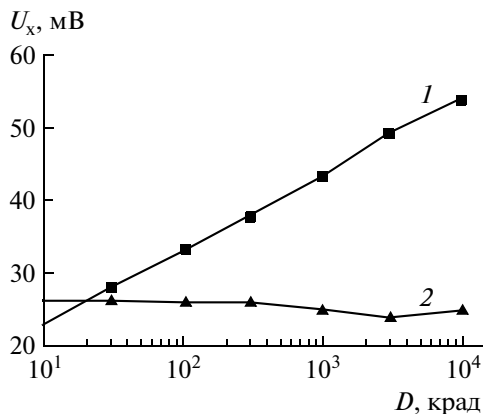
Очевидно, что этот подход наиболее успешен, если значения  $E_{ост}$  для обоих элементов максимально близки друг к другу. Это наиболее реально в том случае, когда оба элемента формируются в едином технологическом цикле на одной пластине полупроводника и имеют достаточно малые размеры (площадь примерно  $\leq 100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>) при минимальном расстоянии между собой (20–30 мкм).

При использовании дискретных элементов Холла больших размеров ( $> 200 \times 200$  мкм при расстоянии между ними  $> 100$  мкм) существенное подавление остаточного напряжения в такой паре становится проблематичным.

Иное дело двухэлементный п.д.Х. Здесь различие значений  $E_{ост}$  может быть достаточно точно скомпенсировано изменением потенциала на любом затворе одного из п.д.Х. при неизменном потенциале на затворе другого (рис. 2).

Отметим, что по мере увеличения потенциала затворов прекращается увеличение э.д.с. Холла, а холловский сигнал начинает уменьшаться, хотя ток через канал продолжает расти. Этот эффект естественно связать с уменьшением подвижности электронов в канале п.д.Х. под влиянием увеличения напряженности поперечного электрического поля, создаваемого потенциалом затвора [10].

Возможность компенсации остаточного напряжения путем изменения напряжения на затворе п.д.Х. в двухэлементной конструкции продемонстрирована в проведенном нами эксперименте. В одном корпусе были смонтированы два кристалла п.д.Х. размером  $500 \times 500$  мкм с расстоянием между ними 500 мкм. При подаче на каж-



**Рис. 3.** Зависимости э.д.с. Холла  $U_x$  от дозы  $\gamma$ -облучения при различных электрических режимах п.д.Х. в процессе облучения: 1 – все электроды п.д.Х. закорочены, напряжение отсутствует; 2 – напряжение подано на электроды питания и управляющие затворы, канал п.д.Х. полностью закрыт и открывается только на время измерения.

дый п.д.Х. напряжения питания 5 В и на соединенные вместе затворы напряжения 5 В остаточное напряжение одного из них составляло 5 мВ, а другого – 3 мВ. После того как п.д.Х. были соединены по схеме, показанной на рис. 1, остаточное напряжение двухэлементного п.д.Х. составило 2 мВ. При изменении потенциала затворов одного из кристаллов п.д.Х. на 1 В и сохранении неизменным этого потенциала в другом п.д.Х. выходной остаточный сигнал уменьшился до 0.1 мВ.

### ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ П.Д.Х. К ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Хорошо известно, что полевые м.д.п.-приборы весьма чувствительны к воздействию стационарного ионизирующего облучения. Основной причиной этого является образование как фиксированного заряда в подзатворном диэлектрике, локализованного преимущественно у границы с полупроводником, так и заряженных поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик–полупроводник [11].

В качестве подзатворного диэлектрика кремниевых м.д.п.-приборов, как правило, используют пленки  $\text{SiO}_2$ . В таких м.д.п.-системах изменение свойств при облучении обусловлено появлением положительного заряда. Поскольку полевые приборы на основе структур “кремний на изоляторе” содержат два подзатворных диэлектрика и две границы диэлектрик–полупроводник, естественно полагать, что устойчивость их характеристик к ионизирующему облучению должна быть ниже, чем у обычных кремниевых м.д.п.-приборов.

Один из способов повышения радиационной стойкости кремниевых м.д.п.-приборов состоит в

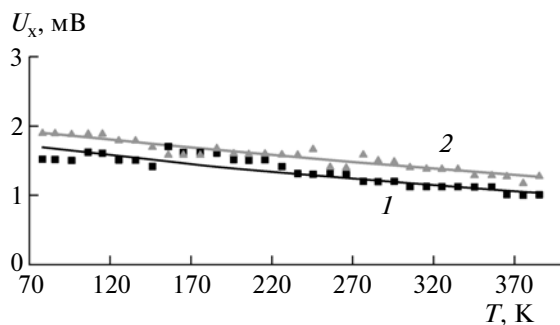
поддержании на электроде затвора отрицательного потенциала. Это стимулирует уход дырок, рожденных радиацией в  $\text{SiO}_2$ , из диэлектрика. Однако с точки зрения работы м.д.п.-прибора в конкретных схемах такой способ повышения радиационной стойкости далеко не всегда возможен. Для управления п.д.Х. используется полевая система, состоящая из двух м.д.п.-систем, одну из которых можно использовать для воздействия на радиационные эффекты, а другую – для реализации функций самого прибора. Напомним, что знак и величину потенциала затворов в п.д.Х. можно изменять независимо друг от друга [3]. Это открывает широкие возможности для варьирования электрических режимов п.д.Х. в процессе облучения.

В [12] продемонстрировано существенное влияние на изменение характеристик п.д.Х. под действием  $\gamma$ -облучения электрических режимов его включения в процессе воздействия радиации. При этом наибольшая устойчивость достигается, если п.д.Х. подсоединен к источнику питания, но при этом токопроводящий канал закрыт отрицательными потенциалами затворов, и по нему протекает только очень слабый подпороговый ток, составляющий доли микроампер (рис. 3). В этом случае затворные потенциалы стимулируют уход радиационно-индуцированных дырок из диэлектриков  $\text{SiO}_2$  в электроды затворов. Одновременно нейтрализуются рождающиеся при облучении поверхностные состояния на  $\text{SiO}_2$ –Si-интерфейсе благодаря подпороговому току и захвату его электронов, движущихся в кремнии у границы с диэлектриком.

Использование такого способа в условиях, когда магнитные измерения необходимо проводить непосредственно при облучении, предполагает следующую процедуру. Находящийся в закрытом состоянии п.д.Х. необходимо открыть путем подачи на затворы импульса положительного напряжения требуемой величины и вновь закрыть после окончания измерения. В наших экспериментах характерное время измерения не превышало 1–2 мс.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ТОКА П.Д.Х. И УМЕНЬШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Известно, что э.д.с. Холла зависит от рабочего тока и индукции магнитного поля [7]. При этом холловский сигнал сильно зависит от температуры. Физически это связано с тем, что при изменении температуры изменяется сопротивление тела датчика (прежде всего, из-за изменения подвижности носителей тока) и, следовательно, величина рабочего тока, если датчик питается от источника постоянного напряжения. Очевидно, что уменьшить зависимость магниточувствительно-



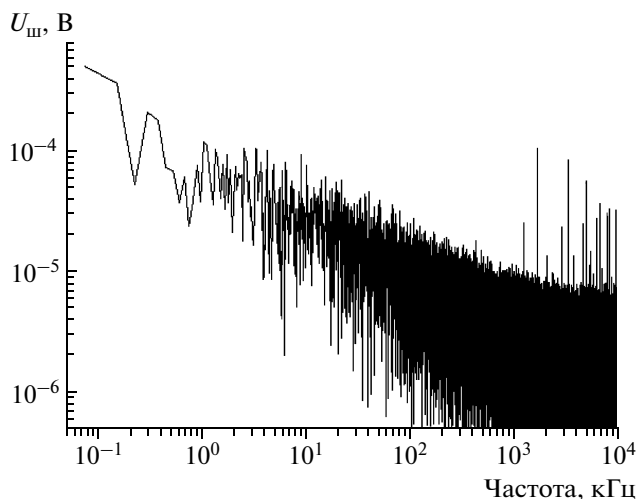
**Рис. 4.** Зависимость э.д.с. Холла  $U_x$  п.д.Х., работающего в режиме генератора тока, от температуры при напряжениях на одном из электродов затворов 0 В (1) или 3.5 В (2). Точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимация. Напряжение на другом электроде затвора переменное. Напряжение питания 5 В. Величина стабилизируемого тока  $I = 100$  мкА.

сти элемента Холла от температуры можно, если датчик будет работать в режиме генератора тока.

Общепринятый путь реализации такого режима применительно к традиционным элементам Холла — использование специального электронного узла, стабилизирующего рабочий ток датчика. Однако в п.д.Х. эта задача может быть решена без помощи дополнительных элементов. Указанная цель может быть достигнута путем изменения потенциала на управляющих затворах п.д.Х., включенных в цепь обратной связи каскада усиления холловского сигнала.

На рис. 4 в качестве примера показана характерная зависимость э.д.с. Холла п.д.Х., работающего в режиме генератора тока, от температуры. Потенциал одного из затворов был равен нулю во всем исследованном температурном диапазоне (80–380 К). Для поддержания постоянства тока канала напряжение на другом затворе п.д.Х. изменялось. Диапазон соответствующих изменений зависел от выбора величины напряжения на другом затворе.

К примеру, если напряжение на одном из затворов отсутствовало, напряжение на втором затворе изменялось от 8.3 до 9.3 В (кривая 1 на рис. 4). При напряжении на одном из затворов 3.5 В напряжение на другом затворе изменялось от 1.8 до 5.2 В (кривая 2 на рис. 4). Напряжение питания в процессе эксперимента оставалось постоянным и было равно 5 В. Согласно рис. 4, коэффициент температурной зависимости э.д.с. Холла в этом случае составляет около 0.01%/К. Температурная зависимость коэффициента магниточувствительности контрольных образцов п.д.Х., работавших в том же интервале температур в режиме генератора напряжения при постоянных значениях потенциала на затворах м.д.п.д.м.-системы, была гораздо выше (~0.4%/К) [1].



**Рис. 5.** Частотная зависимость собственных шумов п.д.Х., измеренная при напряжении питания и смещения на затворах 9 В.

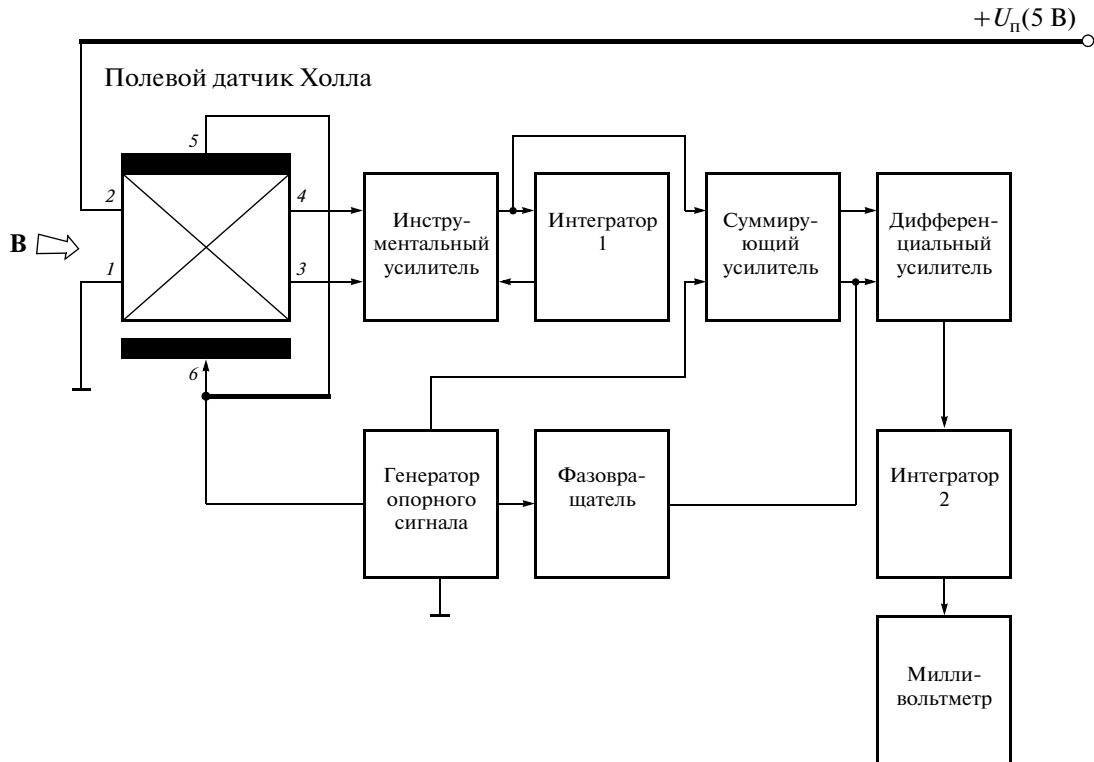
#### ПОВЫШЕНИЕ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ П.Д.Х. ПУТЕМ МОДУЛЯЦИИ ТОКА КАНАЛА И СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Периодическим изменением потенциала затворов м.д.п.д.м.-системы можно модулировать ток канала п.д.Х. и измерять холловский сигнал на частоте модуляции. При этом, используя схему синхронного детектирования холловского сигнала, можно существенно увеличить отношение сигнал/шум. Согласно рис. 5, уже при частотах порядка 100 кГц собственный шум п.д.Х. уменьшается в десятки раз и продолжает снижаться при дальнейшем повышении частоты.

Принципиальная схема измерений индукции магнитного поля при модулировании тока через канал п.д.Х. полевыми затворами и синхронном детектировании холловского сигнала приведена на рис. 6. Использование такой схемы позволило повысить пороговую магниточувствительность п.д.Х. при регистрации постоянного магнитного поля до ~1 мкТл. Дополнительное достоинство затворной модуляции тока канала заключается в снижении коммутационных помех, характерных для обычно используемых схем, в которых модулируется непосредственно холловский сигнал [13].

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНДУКЦИЯ–ЧАСТОТА НА ОСНОВЕ П.Д.Х.

Использование п.д.Х. позволяет не только изменить процедуру измерений магнитной индукции, но и предложить сенсорные устройства с улучшенными характеристиками. Поясним это положение на примере преобразователя “магнитная индукция — частота” [14]. В этом случае п.д.Х.

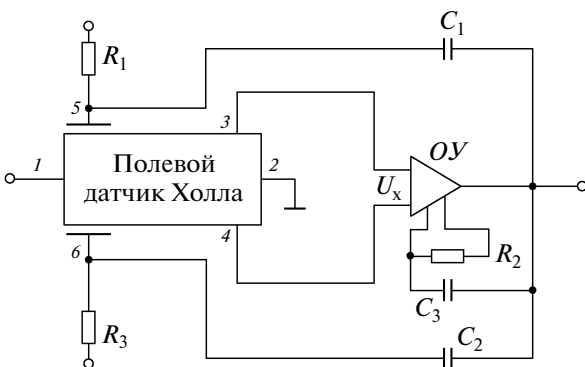


**Рис. 6.** Принципиальная схема измерения магнитного поля на основе синхронного детектирования сигнала п.д.Х. 1, 2 – токовые электроды; 3, 4 – холловские электроды; 5, 6 – электроды затворов.

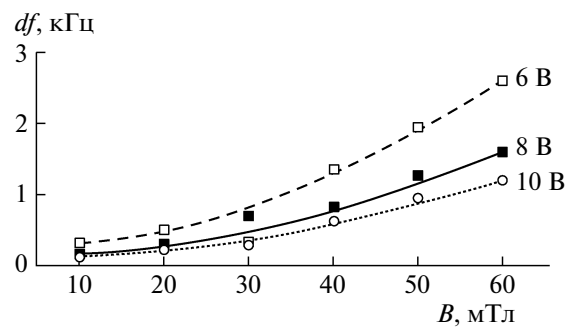
представляет собой элемент, включенный в цепь автогенераторного устройства (рис. 7). Магниточувствительный сигнал усиливается и через автогенераторное устройство поступает на затворы п.д.Х. Частота автогенерации изменяется тем сильнее, чем больше холловский сигнал, т.е. чем больше индукция магнитного поля (рис. 8).

Существенно, что вариацией напряжения питания и потенциалов на затворах п.д.Х. можно ре-

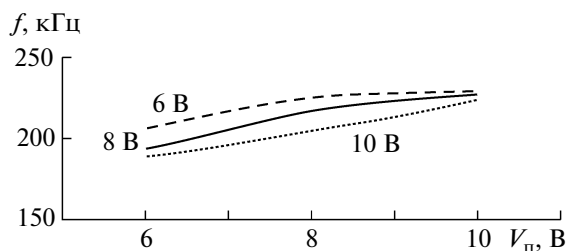
гулировать сопротивления п.д.Х. и емкости областей пространственного заряда, расположенных в канале у границ с диэлектриками. Это позволяет существенно изменять значения основной частоты автогенерации (рис. 9 и 10), что является одним из преимуществ преобразователя индукция–частота на основе п.д.Х. по сравнению с известными преобразователями подобного типа на основе традиционного элемента Холла [15].



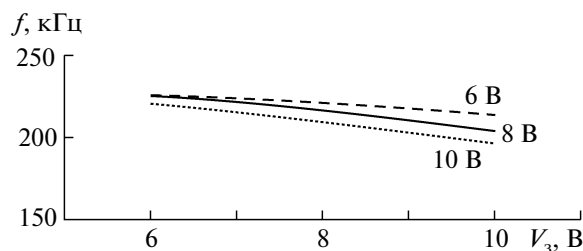
**Рис. 7.** Первичный преобразователь магнитного поля “индукция–частота” на основе п.д.Х. 1, 2 – токовые электроды; 3, 4 – холловские электроды; 5, 6 – электроды затворов п.д.Х.; ОУ – операционный усилитель.



**Рис. 8.** Зависимость изменения частоты автогенерации преобразователя индукция–частота на основе п.д.Х. от индукции внешнего магнитного поля при напряжении питания п.д.Х. 8 В, напряжении на верхнем затворе 8 В и различных напряжениях на нижнем затворе (цифры у кривых).



**Рис. 9.** Зависимость основной частоты автогенерации преобразователя индукция–частота от напряжения питания п.д.Х. при напряжении на верхнем затворе 8 В и различных напряжениях на нижнем затворе (цифры у кривых).



**Рис. 10.** Зависимость основной частоты автогенерации преобразователя индукция–частота от напряжения на одном из затворов п.д.Х. при подаче на другой затвор напряжения различной величины (цифры у кривых).

Полевой датчик Холла можно использовать как нелинейный элемент с автогенераторами на основе различных активных компонентов во всех случаях изменения потенциалов затворов. Это позволяет управлять диапазоном частот генерации и чувствительностью преобразователя. Данные, иллюстрирующие это, приведены в таблице. Измерения проводились при напряжении питания 9 В и двух значениях потенциала, подаваемого на соединенные между собой затворы ( $V_g$ ) м.д.п.д.м.-системы.

#### ГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЕМ НА ОСНОВЕ П.Д.Х. КАК СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ И СПЕКТРОСКОПИИ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Выше было показано, что затворы м.д.п.д.м.-системы п.д.Х. можно использовать для модуляции тока канала, что позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум с помощью синхронного детектирования. В этом случае оба затвора соединяются между собой, и их потенциал изменяется с одинаковой частотой. Однако ничто не мешает на практике подавать потенциалы с различной частотой на затворы независимо друг от друга [16].

В этом случае, если одна из частот фиксирована, а другая – переменна, п.д.Х. будет играть роль смесителя и формировать сигнал промежуточной

частоты. Это позволяет использовать п.д.Х. для измерения индукции и частоты переменного магнитного поля в соответствии с хорошо известным из радиотехники принципом гетеродина. При необходимости измерения переменного магнитного поля такое поле можно рассматривать как своеобразный генератор опорной частоты. В этом случае генератор с переменной частотой может быть присоединен к одному или обоим затворам п.д.Х.

Один из вариантов блок-схемы гетеродинного измерения переменного магнитного поля на основе п.д.Х. приведен на рис. 11. В эксперименте источником магнитного поля с частотой 10 кГц служила катушка индуктивности. Было показано, что чувствительность гетеродинного устройства составляет 97 мВ/мТл, а при включении п.д.Х. в обычном режиме – 0.45 мВ/мТл.

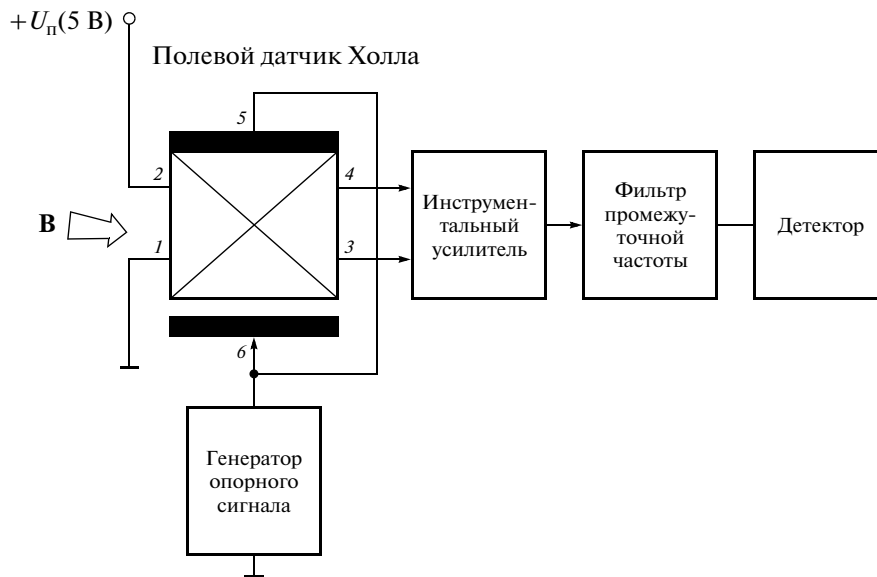
#### МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ П.Д.Х.

Многоэлементные преобразователи магнитного поля широко используются в различных сенсорных системах, таких как устройства дефектоскопии, визуализации магнитного поля, датчики перемещения и др. По характеру расположения магниточувствительных элементов преобразователи могут быть линейными или матричными.

В зависимости от требований решаемой задачи такие преобразователи могут представлять со-

Характеристики преобразователей индукция–частота на основе п.д.Х. с различными конструкциями автогенераторов

Активный компонент	Основная частота, кГц				Чувствительность $S$ , Гц/мТл ( $B = 120$ мТл)	
	$B = 0$		$B = 120$ мТл			
	$V_g = 0$ В	$V_g = 9$ В	$V_g = 0$ В	$V_g = 9$ В	$V_g = 0$ В	$V_g = 9$ В
Таймер КР 1006ВИ1	1004	1010	1000.5	1005.7	29.17	35.83
ИС К525ПС2	80.9	308	81.7	305	6.67	25.00
Транзистор КТ 315	789	245	787	248	16.67	25.00



**Рис. 11.** Блок-схема гетеродинного измерителя переменного магнитного поля на основе п.д.Х. 1, 2 – токовые электроды; 3, 4 – холловские электроды; 5, 6 – электроды затворов п.д.Х.

бой своеобразную интегральную схему, но могут быть изготовлены и путем сборки из дискретных элементов Холла [17]. В любом случае к многоэлементным датчикам предъявляются требования одинаковой магниточувствительности всех элементов и организации системы, обеспечивающей различные виды считывания (параллельная выборка, выборка по строкам или столбцам). Наши эксперименты с восьмиэлементной линейкой п.д.Х. и четырехэлементной матрицей показали, что изменением потенциала затворов элементов можно добиться равенства магниточувствительности всех преобразователей магнитного поля многоэлементного п.д.Х. Кроме того, можно избежать использования ключей в системе питания элементов и осуществить переход элемента из закрытого в открытое (т.е. измерительное) состояние, изменяя потенциалы затворов, что способствует уменьшению коммутационных помех.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полевой датчик Холла сочетает свойства традиционного элемента Холла и полевого транзистора со встроенным каналом и управляющей системой типа м.д.п.д.м. Благодаря малой толщине канала и уровню легирования Si в приборе существует гальваническая связь м.д.п.-затворов и их взаимное влияние на ток канала, что позволяет путем изменения потенциалов затворов управлять характеристиками п.д.Х. (компенсировать остаточное напряжение, уменьшать коэффициент температурной зависимости магниточувствительности, минимизировать радиационные эффекты, управлять

величиной магниточувствительности, стабилизировать рабочий ток).

Система м.д.п.д.м., наряду с обычными схемами обработки сигнала элементов Холла, позволяет использовать новые. К ним относятся преобразование индукция-частота с возможностью в широких пределах изменять рабочую частоту преобразователя, схема улучшения отношения сигнал/шум благодаря затворному модулированию тока канала, использование п.д.Х. в качестве смесителя в гетеродинной схеме измерения индукции и частоты переменных магнитных полей, возможность улучшения характеристик и считывания информации в многоэлементных преобразователях магнитного поля на основе п.д.Х.

Авторы благодарны А.Д. Мокрушину (ИПТМ РАН) и М.М. Филатову (ВНИИА) за помощь в проведении некоторых экспериментов и плодотворные дискуссии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мордкович В.Н., Бараночников М.Л., Леонов А.В. и др. // Датчики и системы. 2003. № 7. С. 33.
2. Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мальцев П.П. и др. // Мир электроники. Сб. статей / Под ред. П.П. Мальцева, М.: Техносфера, 2005. С. 436.
3. Бараночников М.Л., Леонов А.В., Мокрушин А.Д. и др. // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 12. С. 45.
4. Громов Д.В., Мордкович В.Н., Пажин Д.М., Скоробогатов П.К. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2011. Вып. 1. С. 19.

5. Щербачев К.Д., Бублик В.Т., Мордкович В.Н., Пажин Д.М. // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45. Вып. 6. С. 754.
6. Леонов А.В., Мокрушин А.Д., Омеляновская Н.М. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 4. С. 494.
7. Popovich R.S. Hall Effect Devices. Second Edition. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2004.
8. Enz C.C., Temes G.C. // Proc. IEEE. 1996. V. 84. P. 1584.
9. Maupin J.T., Geska M.L. The Hall Effect in silicon circuits / Ed by C.L. Chien and C.R. Westgate. N.Y.: Plenum, 1980. P. 421.
10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн. 2 / Пер. с англ. 2-е перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1984.
11. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов Г.М. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. М.: Энергоатомиздат, 1988.
12. Mokrushin A.D., Omeljanovskaja N.M., Leonov A.V. et al. Radiation effects in SOI magnetic sensitive elements under different radiation conditions. Progress in semiconductor – on-insulator structures and devices operating at extreme conditions. Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. V. 58. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. P. 221.
13. Cooper A., Bringnell I. // J. Phys. E: Sci. Instr. 1984. V. 17. P. 627.
14. Бараночников М.Л., Карпушин М.П., Леонов А.В. и др. Заявка № 2011114215 на патент РФ от 3.04.2011. [http://www1.fips.ru/wps/portal/!ut/p/c1/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os\\_hQlwAnSyMvYwN\\_NxNTAyM3ZwvfAKNAIwNfY6B8pFm8n79RqJup6GhhZmroYGRmYeJk0-Yp4G7izEB3eEg-DrB8kb4ACOBvp-Hvm5qfoFuREGWSaOigD0pHbe/dl2/d1/L0IDU0NTSUpKZ2tLQ2xFS0NsRUEhL29Kb1FBQUIRSkFBTVI4aWxNUVp3WEJNNUpVbE1rQSEhL1ICSkp3NDU0NTAtNUY0a3N0eWowc3J5bndBISEvN19VRFBCOTJKMzBPUEhEMEk5NUhGNlQ2M1E1Ny9LX19fXzIvcmVnTmFtZS9SVVBBVEFQL2FjTmFtZS9jbGlja1JlZ2lzdGVy/](http://www1.fips.ru/wps/portal/!ut/p/c1/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os_hQlwAnSyMvYwN_NxNTAyM3ZwvfAKNAIwNfY6B8pFm8n79RqJup6GhhZmroYGRmYeJk0-Yp4G7izEB3eEg-DrB8kb4ACOBvp-Hvm5qfoFuREGWSaOigD0pHbe/dl2/d1/L0IDU0NTSUpKZ2tLQ2xFS0NsRUEhL29Kb1FBQUIRSkFBTVI4aWxNUVp3WEJNNUpVbE1rQSEhL1ICSkp3NDU0NTAtNUY0a3N0eWowc3J5bndBISEvN19VRFBCOTJKMzBPUEhEMEk5NUhGNlQ2M1E1Ny9LX19fXzIvcmVnTmFtZS9SVVBBVEFQL2FjTmFtZS9jbGlja1JlZ2lzdGVy/)
15. Negodenko O.N., Mardamshin Yu.P. // Technology and design of electronics apparatus. 2000. № 5–6. P. 19.
16. Бараночников М.Л., Мордкович В.Н., Леонов А.В. Патент РФ № 2328014 C1. [http://www1.fips.ru/wps/portal/!ut/p/c1/04\\_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os\\_hQlwAnSyMvYwN\\_NxNTAyM3ZwvfAKNAIwNfY6B8pFm8n79RqJup6GhhZmroYGRmYeJk0-Yp4G7izEB3eEg-DrB8kb4ACOBvp-Hvm5qfoFuREGWSaOigD0pHbe/dl2/d1/L0IDU0NTSUpKZ2tLQ2xFS0NsRUEhL29Kb1FBQUIRSkFBTVI4aWxNUVp3WEJNNUpVbE1rQSEhL1ICSkp3NDU0NTAtNUY0a3N0eWowc3J5bndBISEvN19VRFBCOTJKMzBPUEhEMEk5NUhGNlQ2M1E1Ny9JX19fXzEvcmVnTmFtZS9SVVBBVC9hY05hbWUvY2xpY2tSZWdpc3Rlcl!/](http://www1.fips.ru/wps/portal/!ut/p/c1/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os_hQlwAnSyMvYwN_NxNTAyM3ZwvfAKNAIwNfY6B8pFm8n79RqJup6GhhZmroYGRmYeJk0-Yp4G7izEB3eEg-DrB8kb4ACOBvp-Hvm5qfoFuREGWSaOigD0pHbe/dl2/d1/L0IDU0NTSUpKZ2tLQ2xFS0NsRUEhL29Kb1FBQUIRSkFBTVI4aWxNUVp3WEJNNUpVbE1rQSEhL1ICSkp3NDU0NTAtNUY0a3N0eWowc3J5bndBISEvN19VRFBCOTJKMzBPUEhEMEk5NUhGNlQ2M1E1Ny9JX19fXzEvcmVnTmFtZS9SVVBBVC9hY05hbWUvY2xpY2tSZWdpc3Rlcl!/)
17. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. В 2-х т. Т. 1. М.: ДМК Пресс, 2001.