

07

## **Тонкопленочный кремниевый магниточувствительный полевой транзистор холловского типа с расширенным до 350°С диапазоном рабочих температур**

© А.В. Леонов<sup>1</sup>, А.А. Малых<sup>1</sup>, В.Н. Мордкович<sup>1</sup>, М.И. Павлюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Московская область, Черноголовка

<sup>2</sup> ЗАО «ПКК Миландр», Москва, Зеленоград

E-mail: malykhanton21@gmail.com

Поступило в Редакцию 4 августа 2015 г.

Рассматривается магниточувствительный элемент, представляющий собой комбинацию тонкопленочного Si-транзистора со встроенным каналом, изготовленного по технологии „кремний на изоляторе“, и элемента Холла. Транзистор имеет двухзатворную управляющую полевую систему типа металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл. Он функционирует в режиме обогащения канала носителями тока при частичном обеднении областей пленки Si, прилегающих к каналу. Показано, что прибор функционирует до температур порядка 350°С (что на 160–180°С выше, чем у элемента Холла, изготовленного на основе объемных кристаллов Si) и не уступает по этому параметру элементам Холла на основе широкозонных полупроводников.

В последние годы практика применения микроэлектронных сенсоров в различных устройствах свидетельствует о необходимости расширения диапазона рабочих температур в сторону ее увеличения. Так автоэлектроника, авионика, нефте- и газодобыча в глубоких скважинах нуждаются в аппаратуре (в том числе магнитометрической), функционирующей при температуре до 300–350°С. К сожалению, предельная рабочая температура традиционных датчиков, изготовленных из объемного Si (а именно, на основе объемных монокристаллов кремния производится большинство дискретных и интегрированных датчиков магнитного поля [1]), составляет лишь 150–170°С. Это связано с тем, что по мере роста температуры увеличивается концентрация термически ге-

нерированных носителей в кремнии, которая становится сравнимой с концентрацией основных носителей, что существенно ухудшает характеристики приборов. Применительно к дискретным магнитным микроэлектронным датчикам задача может быть решена путем использования широкозонных полупроводников, таких как GaAs, InAs, GaN, GaAlAs и др., и многослойных структур на их основе. Однако для изготовления функциональной электроники обработки магнитоиндуцированных сигналов по-прежнему приходится использовать кремниевые ИС [1], не обеспечивающие возможности функционирования при повышенных температурах. К тому же по технико-экономическим показателям такой лобовой подход к решению проблемы далеко не всегда оправдан.

Известно, однако, что рабочую температуру кремниевых дискретных приборов и ИС можно существенно повысить, если для их изготовления использовать технологию „кремний на изоляторе“ (КНИ). Приборы в этом случае формируют в тонком слое Si, отсеченном от кремниевой подложки слоем скрытого в ней диэлектрика SiO<sub>2</sub>. В таких приборах слой SiO<sub>2</sub> является барьером, препятствующим переходу термогенерированных в подложке носителей тока в тонкий слой Si, в котором формируются активные области приборов. При этом толщина отсеченного слоя Si настолько мала (обычно не превышает 100–200 nm), что термогенерированные носители влияют на свойства КНИ-транзисторов при заметно более высоких температурах (порядка 200–250°С), чем у их Si-аналогов. КНИ-технология в последние годы все более широко используется в производстве высокотемпературных ИС. Однако ее применение для изготовления высокотемпературных датчиков до сих пор весьма ограничено и касается главным образом датчиков давления.

Данная работа посвящена созданию тонкопленочного кремниевого магниточувствительного транзистора холловского типа со встроенным каналом и двухзатворной полевой управляющей системой типа металл–диэлектрик–полупроводник–диэлектрик–металл (МДПДМ) [2]. Используется КНИ-транзистор со встроенным каналом, работающий в режиме обогащения носителями, сформированный в тонком слое кремния КНИ-структуры, отсеченном от подложки слоем SiO<sub>2</sub>. Области вне обогащенной пленки кремния находятся в состоянии частичного обеднения. Конструкция датчика поясняется рис. 1. Из рис. 1, b, в частности, видно, что помимо традиционного для МОП-транзистора элемента управления током канала, образованного электродом затвора, подзатворной пленкой SiO<sub>2</sub> на внешней поверхности тонкого слоя Si и

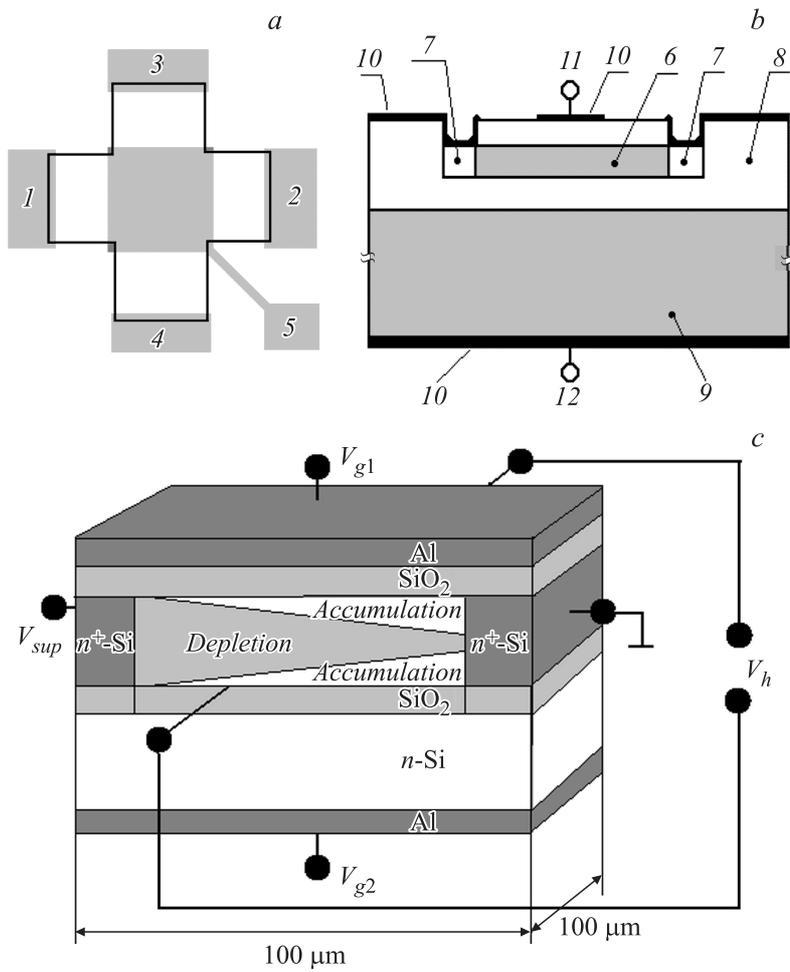
отсеченным слоем Si, датчик содержит вторую управляющую полевую систему, состоящую из металлизированной снизу подложки и скрытого слоя SiO<sub>2</sub> КНИ-структуры.

Характеристики такого КНИ магниточувствительного элемента принципиально отличны от таковых для традиционных полупроводниковых элементов Холла (ЭХ). Обычные ЭХ являются резисторами, магнитоиндуцированный сигнал которых пропорционален индукции магнитного поля. В нашем случае эдс Холла зависит не только от напряжения питания и величины протекающего тока, но и от напряжения на затворах полевого КНИ-транзистора. В таком датчике реализуется двойное полевое управление магниточувствительностью, коэффициентом ее температурной зависимости, радиационной стойкостью и другими свойствами [2,3]. Далее называем такой магниточувствительный элемент полевым датчиком Холла (ПДХ).

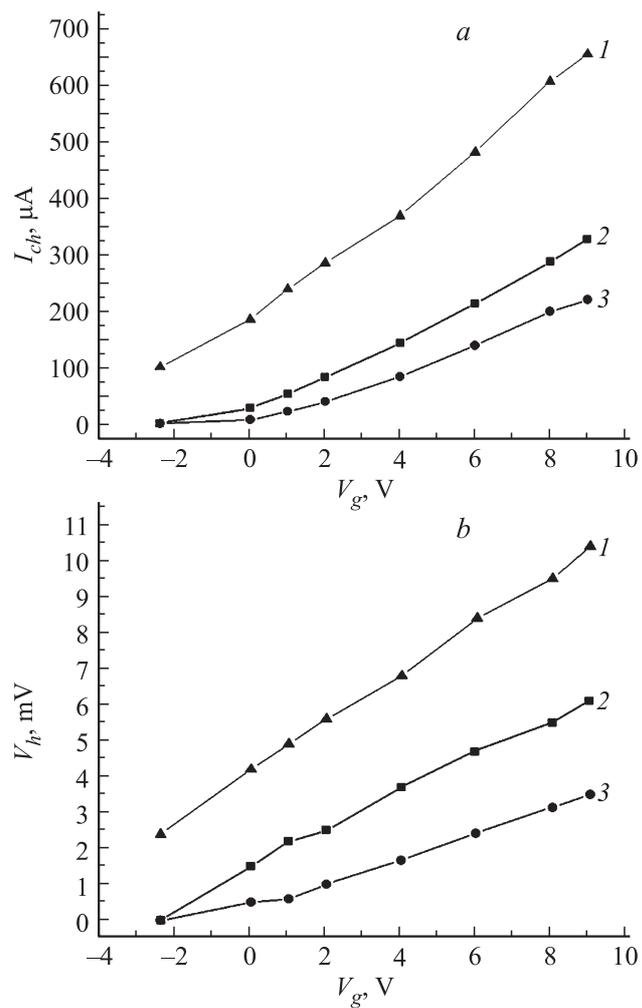
При приложении потенциала к затворам ПДХ концентрация электронов в пленке Si перераспределяется, при этом образуются одна или две области с повышенной (по сравнению с концентрацией легирующих доноров) концентрацией электронов и две или одна области обеднения электронами остальной части кремниевого слоя. Количество обогащенных и обедненных областей зависит от знака потенциалов затворов, а концентрация электронов в них — от величины указанных потенциалов и фиксированного заряда в обоих подзатворных диэлектриках.

В данной работе была детально исследована ситуация, когда оба затвора ПДХ находились под положительным потенциалом и вблизи границ с обоими диэлектриками возникали обогащенные электронами каналы КНИ-транзистора (рис. 1, с). В этом случае двухзатворная конструкция позволяет реализовать целый ряд оригинальных схем измерения магнитоиндуцированного сигнала и расширить области применения ПДХ [3].

ПДХ изготавливались на основе КНИ-структур со слоем Si *n*-типа проводимости (толщина 0.2 μm, ориентация (100), концентрация доноров  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ), отделенного от подложки из *n*-Si (толщина 0.5 mm, ориентация (100), концентрация доноров  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) слоем SiO<sub>2</sub> толщиной 0.2 μm, толщина верхнего подзатворного слоя SiO<sub>2</sub> также составляет 0.2 μm. Кристалл ПДХ помещался в керамический корпус, содержащий золоченую площадку для размещения кристалла и золоченые контактные площадки. Соединение ПДХ с площадкой корпуса осуществлялось через эвтектический сплав Au-Si, токовые и холлов-



**Рис. 1.** Конструкция КНИ ПОС: *a* — вид сверху: 1, 2 — токовые электроды, 3, 4 — холловские электроды, 5 — электрод верхнего затвора; *b* — 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 — верхний затвор, 12 — нижний затвор; *c* — характерное распределение электронов в структуре ПОС в режиме аккумуляции носителей заряда.



**Рис. 2.** Типовые характеристики ПДХ для различных температурных точек. Сток-затворная (a) и холл-затворная (b) характеристики ПДХ при различных температурах, °C: 1 — 20, 2 — 210, 3 — 330;  $V_{sup} = 9$  V.

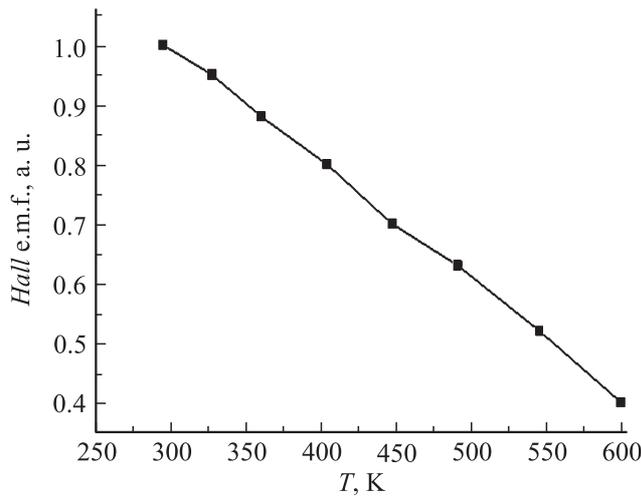


Рис. 3. Температурная зависимость эдс Холла:  $V_{sup} = V_g = 9$  V.

ские электроды, так же как и электрод верхнего полевого затвора, соединялись с соответствующими площадками корпуса Al-проволокой методом термокомпрессии. Присоединение крышки к основанию корпуса осуществлялось термостойким клеем. Измерения характеристик ПДХ проводилось в диапазоне температур 20–350°C. Напряжение питания при этом составляло 9 V; потенциал обоих затворов, соединенных между собой, изменялся в пределах  $-2.5-9$  V; величина индукции магнитного поля при измерении эдс Холла составляла 50 mT. На рис. 2, a, b показаны характерные сток-затворные и холл-затворные характеристики ПДХ для трех температурных точек, а на рис. 3 — температурная зависимость эдс Холла в указанном диапазоне температур. Убывание эдс Холла с увеличением температуры обусловлено чисто физическим процессом, а именно уменьшением подвижности электронов и соответственно рабочего тока ПДХ при неизменном в условиях опыта напряжении питания. Однако в [3] было показано, что двухзатворная конструкция ПДХ легко позволяет организовать обратную связь между холловскими контактами и выходом источника питания, т. е. перевести измерения ПДХ в режим постоянного тока и

тем самым существенно подавить влияние изменений температуры на магнитоиндуцированный сигнал.

Из эксперимента следует, что максимальная температура ПДХ составила 350°C. Это по крайней мере на 160–180°C выше, чем у традиционных Si-датчиков Холла [1]. Таким образом, показано, что КНИ тонкопленочный Si-магнитотранзистор может быть использован в высокотемпературной сенсорной аппаратуре, создание которой на основе традиционных Si-ЭХ невозможно. Существенно, что достигнутый температурный предел не уступает результатам, полученным при использовании многослойных структур широкозонных полупроводников [4,5].

В заключение обратим внимание на то, что полученные значения максимальной рабочей температуры ПДХ не является физическим пределом для такого типа магниточувствительных приборов. Предварительный анализ показал, что, варьируя концентрацию доноров в слое Si КНИ-структуры, толщину этого слоя, величину заряда в подзатворном и скрытом диэлектриках, изменяя потенциалы затворов, оптимизируя технологию посадки кристалла в корпус и изготовления электродов контактов ПДХ, конструкции самого корпуса, можно будет повысить рабочую температуру такого кремниевого магниточувствительного элемента еще примерно на 100–150°C.

Важно подчеркнуть также, что рабочую температуру КНИ-ИС, используемых в сенсорной аппаратуре, также можно повысить до значений порядка 400°C [6].

Работа выполнена при поддержке МОН РФ (соглашение № 14.576.21.0064).

## Список литературы

- [1] Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. М.: изд. ДМК, 2014. Т. 2. 887 с.
- [2] Baranochnikov M.L. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2012. V. 55. N 6. P. 701–708.
- [3] Mordkovich V.N., Baranochnikov M.L., Leonov A.V. et al. // Vienna. Tech. Univ. Publ. EMSA-2014. Book of Abstracts. P. 34.
- [4] Koide S., Takashi H., Abderrahmane A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2012. V. 352-1. P. 012–009.
- [5] Iankowski I., El-Amar S., Oszwaldowski M. // Sensor. 2011. V. 11. P. 876–885.
- [6] Schmidt A., Kappat H., Kokozhinski R. // J. Microelectron. Electronics Packaging. 2013. V. 10. N 4. P. 171–192.