

**А.С. Павлюченко, А.Л. Кукла,
Ю.В. Голтвянский, В.М. Архипова,
С.В. Дзядевич, А.П. Солдаткин**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК рН-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Исследован дрейф вольт-амперных характеристик и порогового напряжения *p*-канальных ионоселективных полевых транзисторов с индуцированным каналом при длительных воздействиях открывающего рабочего напряжения, приложенного к области канала через двухслойный подзатворный диэлектрик SiO₂/Si₃N₄. Приведены данные экспериментов, на основании которых выдвинуто предположение о механизме наблюдаемой нестабильности. Показано, что отжиг в водородной среде на завершающей стадии процесса изготовления датчиков улучшает стабильность их характеристик.

Ключевые слова: ионоселективный полевой транзистор (ИСПТ), нитрид кремния, пороговое напряжение, дрейф.

Со времени открытия П. Бергвельдом ионной чувствительности структуры электролит—диэлектрик—кремний [1] разработан и исследован новый класс сенсоров — ионоселективные полевые транзисторы (ИСПТ). Их преимуществами являются малые размеры, высокое быстродействие и возможность массового изготовления с помощью микроэлектронной кремниевой технологии. В настоящее время ионоселективные полевые транзисторы являются альтернативой стеклянным рН-чувствительным электродам как для обычной рН-метрии, так и для ряда специальных применений, включающих анализ активности ионов различных типов с применением ионофоров [1]. Широко известно также использование ИСПТ как биосенсоров, основанных на биохимических методах анализа с применением реакций, происходящих либо с выделением, либо с поглощением протонов [2—4].

В первых разработанных образцах ИСПТ в качестве ионоселективного материала использовался оксид кремния (SiO₂) [5]. Вскоре после этого было обнаружено, что применение в этом качестве нитрида кремния (Si₃N₄) обеспечивает более высокую рН-чувствительность [6], однако теоретическое обоснование этому факту было дано позже: с появлением модели связывающих центров [7, 8] и с введением понятия собственной буферной емкости диэлектрика [9]. Поверхность нитрида кремния обладает лучшей способностью к связыванию протонов, вследствие чего обеспечивается более высокая чувствительность и линейность в широком диапазоне величин рН [10]. Кроме того, нитрид кремния является химически стойким соединением и менее подвержен влиянию ионных воздействий при контакте с растворами [11].

Роль затвора в ионоселективном полевом транзисторе выполняет анализируемый раствор, непосредственно соприкасающийся с подзатворным диэлектриком. Для описания процессов на границе раздела электролит—диэлектрик, приводящих к изменению управляющего напряжения в цепи затвора транзистора при изменении активности протонов в растворе, обычно используется модель двойного заряженного слоя в электролите, состоящего из слоя Гельмгольца и диффузионного слоя Гюи—Чапмена [13]. Эта модель, однако, не учитывает явления пе-

© А.С. Павлюченко, А.Л. Кукла, Ю.В. Голтвянский, В.М. Архипова, С.В. Дзядевич, А.П. Солдаткин, 2010

реноса заряда, которые могут происходить на границе раздела жидкой и твердой фаз. Например, может иметь место диффузия протонов из раствора в объем ди-
90 ISSN 0233-7577. Оптоэлектроника и полупроводниковая тех-
ника, 2010, вып. 45

электрика. Такой перенос заряда вызывает дополнительный протонный отклик [14], который можно рассматривать как долговременную нестабильность структуры. Дополнительный ионный обмен с раствором происходит также с участием «скрытых» центров связывания, расположенных в приповерхностном гидратированном слое нитрида кремния [15]. Нестабильность рассматриваемой структуры может быть также вызвана наличием подвижного заряда в диэлектрическом слое [16, 17], который под воздействием приложенного электрического поля может смещаться в объеме диэлектрика. Механизмы протекания всех упомянутых выше процессов зависят от электростатических параметров системы электролит—диэлектрик и обуславливают появление долговременного дрейфа в регистрируемых откликах датчиков.

Возникающие при этом вопросы практического характера заключаются в выяснении, во-первых, количественных параметров динамики процессов нестабильности для определения степени их влияния на информативную составляющую откликов ИСПТ-датчиков, во-вторых, необходимости перекалибровки датчиков при долговременной их работе, а в-третьих, наличия необратимых изменений в структуре датчиков, вызванных этими процессами и степени их влияния на метрологические характеристики датчиков.

Таким образом, цель данной статьи — исследовать факторы, определяющие стабильность системы кремний—оксид кремния—нитрид кремния—электролит при воздействии слабых электрических полей, характерных для рабочих режимов ИСПТ.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Особенности конструкции кристалла ИСПТ — отсутствие металлического затвора над каналом и достаточная удаленность от него контактных площадок, необходимая для удобного подвода анализируемых веществ к подзатворному диэлектрику. В нашей работе реализованы два варианта конструкции ИСПТ с каналами *n*- и *p*-типа.

Вариант ИСПТ канала *p*-типа позволяет использовать простую и дешевую технологию изготовления прибора. В качестве подложки использовались кремниевые пластины *n*-типа <100> с концентрацией примеси 10^{15} см^{-3} . На поверхности термическим окислением в потоке влажного кислорода при температуре 1100 °С получали слой SiO_2 толщиной 0,65 мкм, который служил маской во время термической диффузии бора в области истока и стока. В процессе двухстадийной диффузии толщина SiO_2 увеличивалась до 0,8 мкм, обеспечивая тем самым порог инверсии под окислом не менее 20 В. *p-n*-Переход истоковых и стоковых областей глубиной 4 мкм обеспечивает величину пробивного напряжения не менее 40 В. Двухслойный подзатворный диэлектрик состоял из слоев оксида и нитрида кремния толщиной 50 нм каждый. Оксид формировался окислением в сухом кислороде при температуре 1000 °С, Si_3N_4 получался осаждением в реакторе пониженного давления при 780 °С в ходе реакции дихлорсилана с аммиаком. Для сравнения электрических характеристик на кристалле одновременно с ИСПТ формировался транзистор МНОП с алюминиевым затвором. Транзисторы ИСПТ и тестовый МНОП различаются отношением ширины к длине канала W/L : для МНОП оно равно 1, для ИСПТ — 100. Поперечный разрез *p*-канальной структуры показан на рис. 1,а.

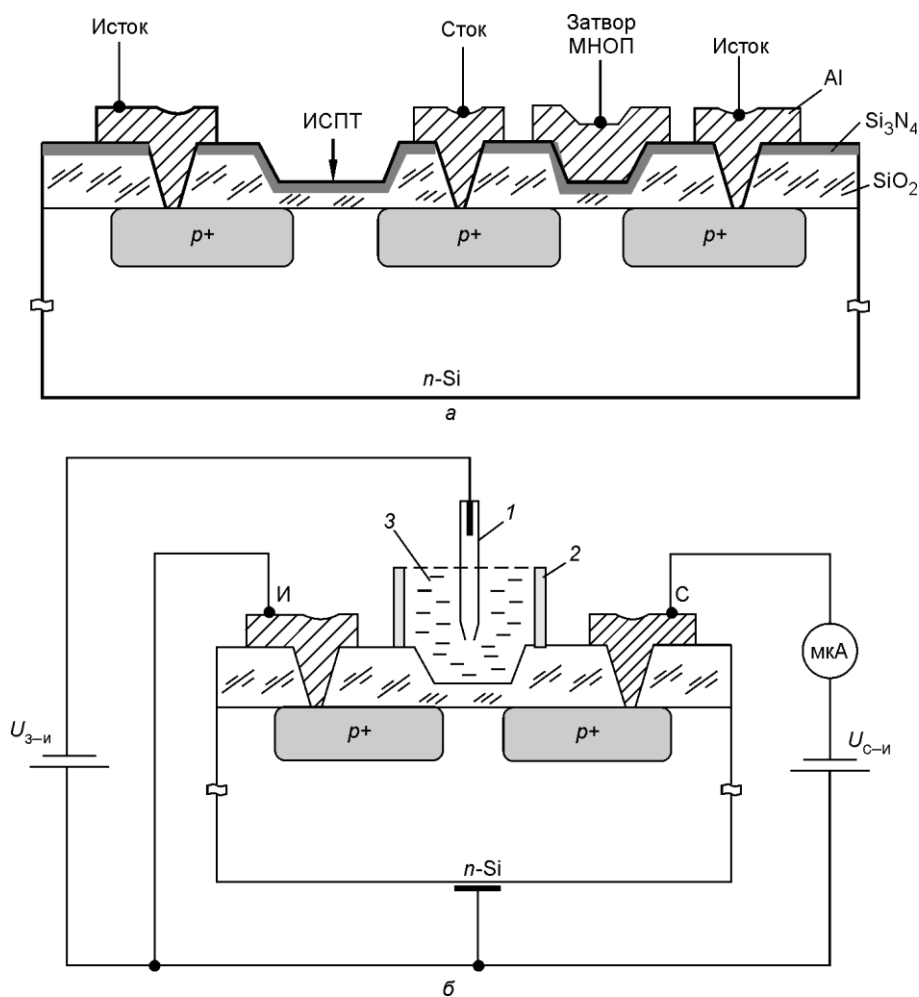


Рис. 1. Поперечный разрез кремниевой структуры, на котором сформированы ИСПТ и МНОП транзисторы (а), а также схема подключения ИСПТ для проведения измерений (б): 1 — электрод сравнения; 2 — электролитическая ячейка; 3 — раствор

Второй вариант конструкции ИСПТ базируется на n -канальном транзисторе. Он сложнее технологически, так как требует локального окисления пассивных областей кристалла, изготовленного на кремниевых пластинах p -типа с дополнительным подлегированием бором в пассивных областях кристалла для предотвращения инверсии заряда на границе $\text{Si}-\text{SiO}_2$.

Стабильность структуры оценивалась по изменению зависимости тока стока от напряжения затвор—исток $I_c = f(U_{з-и})$ в линейной области переходной характеристики при постоянном напряжении стока $U_{с-и} = -2$ В. Напряжение к диэлектрику над каналом ИСПТ прикладывалось посредством индиевого зонда или через хлорсеребряный электрод сравнения (ЭС) в специально сконструированной фторопластовой электролитической ячейке (рис. 1, б). Как электролит использовали фосфатный буферный раствор $\text{pH} = 7,0$. За пороговое принималось напряжение на затворе, при котором ток в канале начинал превышать 2 мкА.

Переходные вольт-амперные характеристики для транзисторов ИСПТ и МНОП подобны и в линейной области представляются зависимостью [2]:

$$I_c = C_d \mu \frac{W}{L} [(U_{з-и} - U_T) U_{с-и} - U_{с-и}^2 / 2], \quad (1)$$

где C_d — удельная емкость диэлектрика; W и L — ширина и длина канала соответственно; μ — подвижность носителей заряда в канале. В обоих случаях ток стока I_c линейно зависит лишь от управляющего напряжения на затворе $U_{з-н}$, если параметр $\beta = \mu C_d W/L$, приложенное к транзистору напряжение $U_{с-н}$ и пороговое напряжение U_T постоянны.

Изменение заряда вблизи границы раздела раствора с диэлектриком вызывает изменение порогового напряжения, а значит, изменение тока в канале. Выражения для величин порогового напряжения транзисторов МНОП и ИСПТ имеют некоторые различия. В случае транзистора МНОП пороговое напряжение выражается следующим образом [2]:

$$U_{T \text{ МНОП}} = \frac{\Phi_M - \Phi_{Si}}{q} - \frac{Q_d + Q_{ss} + Q_b}{C_d} + 2\varphi_F, \quad (2)$$

где Φ_M и Φ_{Si} — работа выхода электрона из металла и кремния; Q_d , Q_{ss} , Q_b — заряды соответственно диэлектрика, поверхностных состояний на границе Si—SiO₂ и полупроводника; φ_F — напряжение Ферми.

В случае ИСПТ затворное напряжение прикладывается к транзисторной структуре через электролит с помощью электрода сравнения, поэтому выражение для порогового напряжения приобретает вид [3]:

$$\begin{aligned} U_{T \text{ ИСПТ}} &= E_{ref} - \psi + \chi_{sol} - \frac{\Phi_{Si}}{q} - \frac{Q_d + Q_{ss} + Q_b}{C_d} + 2\varphi_F = \\ &= U_{T \text{ МНОП}} + E_{ref} - \psi + \chi_{sol} - \frac{\Phi_M}{q}, \end{aligned} \quad (3)$$

где E_{ref} — постоянный потенциал ЭС; $\psi + \chi_{sol}$ — интерфейсный потенциал на границе раствор—диэлектрик: потенциал ψ , зависит от уровня pH в растворе и обусловлен зарядом, аккумулированным на поверхностных центрах затворного диэлектрика, χ_{sol} — дипольный потенциал раствора, имеющий постоянное значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проверка зарядовой стабильности двухслойного диэлектрика на кристаллах осуществлялась на транзисторе МНОП, который после измерения исходной переходной характеристики последовательно выдерживался по 4 ч при напряжениях -8 В и $+8$ В на затворе относительно заземленных выводов истока, стока и подложки. После каждого испытания снималась характеристика $I_c = f(U_{з-н})$. Выяснено, что длительное воздействие положительного потенциала практически не влияет на вид характеристики, т.е. пороговое напряжение транзистора не изменяется. Воздействие же отрицательного потенциала на некоторых образцах вызывало лишь незначительное возрастание тока в канале, соответствующее сдвигу порогового напряжения на единицы милливольт. Исходя из этого можно заключить, что объемный заряд в диэлектрике или полупроводнике (т.е. величины Q_d и Q_{ss}) практически не изменяется при таких условиях и, таким образом, не влияет на работу транзисторов.

Из сравнения характеристик МНОП и ИСПТ видно (рис. 2), что они имеют разную крутизну, связанную с различием отношения W/L , и заметно разнесены по оси напряжений. Возрастание порогового напряжения ИСПТ в сравнении с МНОП происходит из-за наличия дополнительных электрохимических потенциалов в уравнении (3), отличающих его от (2).

Воздействие отрицательного напряжения на ИСПТ, приложенного через электрод сравнения и электролит при заземленных остальных вы-

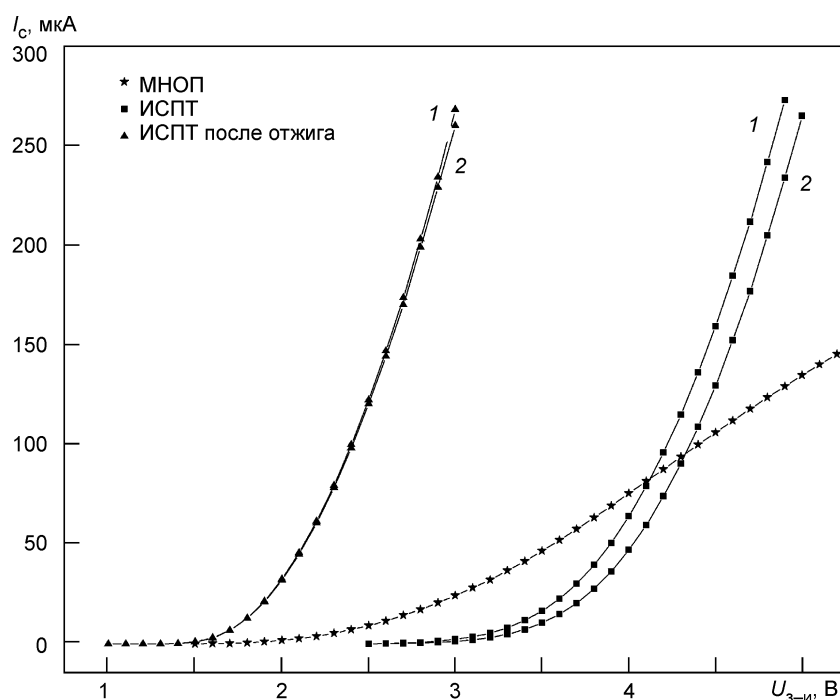


Рис. 2. Переходные характеристики p -канальных транзисторов ИСПТ и МНОП: 1 — исходная характеристика; 2 — после 4 ч выдержки под напряжением $U_{з-и} = -8\text{В}$; для МНОП транзистора характеристика не изменяется для указанных состояний. Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные кривые для отожженных ИСПТ-образцов

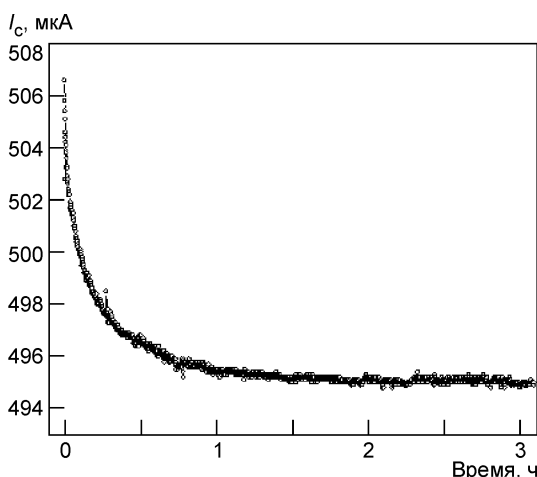
водах прибора, показало, что характеристики $I_c = f(U_{з-и})$ имеют тенденцию к постепенному уменьшению тока в канале. При этом пороговое напряжение в результате полевого воздействия под напряжением -8В в течение 1,5 ч в среднем возрастает примерно на 50 мВ. Эти результаты проверялись на транзисторах, изготовленных в разное время, и во всех случаях эта тенденция сохранялась. Кинетика изменения тока в канале ИСПТ показана на рис. 3. При воздействии положительного потенциала на ИСПТ сдвиг в характеристиках $I_c = f(U_{з-и})$ не наблюдался.

Проведенные эксперименты показали, что дрейф характеристик ИСПТ имеет ряд таких особенностей:

- если отключить отрицательный потенциал от электрода сравнения и оставить ИСПТ в растворе, то вид характеристики $I_c = f(U_{з-и})$ сохраняется таким же, каким он был на момент отключения;
- если после отключения отрицательного потенциала раствор удалить, а образец высушить, то пороговое напряжение и, следовательно, ток в канале постепенно примут исходные значения;
- смещение порогового напряжения увеличивается с увеличением потенциала на затворе;
- небольшое отрицательное напряжение на затворе, близкое к нулю, практически не влияет на характеристики транзистора;
- при положительном напряжении на затворе дрейф характеристик не наблюдается; последнее подтвердилось также на n -канальных ИСПТ.

Эти эффекты свидетельствуют о том, что наблюдаемый дрейф характеристик ИСПТ может обуславливаться неравновесным процессом накопления положительного заряда на поверхности диэлектрика. Для обоснования механизма такого процесса можно предложить следующую модель.

Рис. 3. Кинетика изменения тока в канале ИСПТ при приложенном к выводам транзистора напряжении $U_{з-и} = U_{с-и} = -4,5$ В; исток и подложка заземлены



Известно, что в нитриде кремния присутствуют ловушки, способные к захвату как положительных, так и отрицательных зарядов, при этом ловушки положительного заряда имеют меньшую глубину [18]. Благодаря большому количеству «мелких» ловушек в приповерхностном слое нитрида кремния под действием внешнего электрического поля положительный заряд может перемещаться по этим ловушкам к поверхности и накапливаться в поверхностных состояниях. При этом происходит поляризация тонкого приповерхностного слоя нитрида кремния, граничащего с электролитом. Поскольку подвижность локализованного заряда ловушек невелика, то этот процесс несколько затянут во времени, его быстрая фаза составляет единицы минут, а медленная — часы (см. рис. 3).

Отметим, что сразу после погружения датчика в раствор на поверхностных центрах нитрида кремния селективно захватываются ионы водорода H^+ и гидроксид-ионы OH^- с общим зарядом σ_0 , зависящим от уровня pH в растворе [9]. Поскольку измерения проводились при $pH = 7$, а точка нулевого заряда поверхности (уровень pH, при котором заряд поверхностных центров диэлектрика равен нулю) pH_{pzs} для Si_3N_4 составляет 3—3,4 [19], то адсорбированный заряд σ_0 отрицателен. Соответственно, заряд диффузионного слоя электролита σ_e должен быть положителен. На рис. 4 приведено распределение зарядов в рассматриваемой структуре и изменение потенциала при подаче отрицательного напряжения, прикладываемого к электролиту.

Условие электронейтральности системы в целом предполагает, что общий заряд в системе равен нулю, и для исходного состояния (после включения затворного напряжения) это условие имеет вид

$$\sigma_e + \sigma_0 + \sigma_s = 0, \quad (4)$$

где σ_s — положительный заряд полупроводника, состоящий из заряда инверсионного слоя и заряда ионизированных доноров. При этом для исходного состояния (см. рис. 4, кривая 1) приложенное к структуре затворное напряжение $U_{з-и}$ распределяется таким образом:

$$U_{з-и} = U_s + U_d + U_n - U_e. \quad (5)$$

Здесь обозначены падения напряжения: U_s — на кремнии, U_n — на приповерхностном слое нитрида, U_d — на остальной толщине диэлектрика, U_e — в слое электролита.

По мере накопления избыточного положительного заряда σ_n в поверхностном слое диэлектрика возникает внутреннее электрическое поле противоположного направления, частично экранирующее объем полупроводника от проникновения внешнего поля. В результате поле в кремнии уменьшается и, соответственно, уменьшается инверсный заряд в канале, а также его проводимость, что эквивалентно повышению порогового напряжения ИСПТ.

ние напряжения на поверхностном слое нитрида $\Delta\phi_n$. Следовательно, результирующий баланс приложенного затворного напряжения (7) будет достигаться.

Вычитая из (5) выражение (7), получаем результирующее изменение разности потенциалов: $\Delta\phi_s + \Delta\phi_d + \Delta\phi_n = \Delta\phi_e$. Таким образом, уменьшение поверхностного потенциала полупроводника на $\Delta\phi_s$ приводит к наблюдаемому в эксперименте уменьшению тока. При этом, чтобы вернуть ток к прежнему значению, соответствующему исходному состоянию (5), приложенное напряжение $U_{з-н}$ в (7) нужно увеличить на $\Delta\phi_e$, т.е. именно это значение и равно эквивалентному возрастанию порогового напряжения ИСПТ.

Легко понять, что за счет существования двойного электрического слоя в электролите избыточный поверхностный заряд в нитриде кремния σ_n будет сохраняться и после отключения напряжения, и лишь после извлечения кристалла из раствора этот заряд постепенно распределится по диэлектрику.

Оценим избыточные заряды, возникающие в системе. Изменение заряда в электролите (на единицу площади поверхности) определяется так:

$$\Delta\sigma_e = C_e \Delta\phi_e = C_e \Delta U_T, \quad (8)$$

где ΔU_T — изменение порогового напряжения ИСПТ, равное 0,05 В. Приняв $C_e = 2$ мкФ/см², получаем заряд $\Delta\sigma_e = 10^{-7}$ Кл/см². Учитывая, что $|\Delta\sigma_e| \approx |\sigma_n|$, и принимая $C_n = 2,5$ мкФ/см² (при $d_n = 2$ нм), находим $\Delta\phi_n = \sigma_n/C_n \approx 0,04$ В. Тогда изменение разности потенциалов на остальной части диэлектрика и в кремнии вместе составляет $\Delta\phi_s + \Delta\phi_d \approx 0,01$ В. Наконец, плотность ловушек в поверхностном слое нитрида кремния, которая участвует в удержании избыточного заряда, равна $N_n = \sigma_n/q = 0,6 \cdot 10^{12}$ см⁻². Полученное значение, очевидно, не противоречит типовым значениям плотности поверхностных состояний для нитрида кремния.

Известно, что наличие водорода в пленках Si₃N₄ существенно влияет на их свойства [20]. Водород заполняет разорванные связи на поверхности и в объеме диэлектрика, уменьшая плотность мелких ловушек в запрещенной зоне. Поэтому исследуемые кристаллы после первой серии опытов отжигались в водороде при температуре 500 °С. Одновременно с готовыми кристаллами отжигались специально подготовленные для ИК-спектроскопии образцы.

На отожженных образцах повторялась серия экспериментов, описанная выше. Измерения показали, что на этих образцах смещение характеристик $I_c = f(U_{з-н})$ после выдержки ИСПТ при напряжении $U_3 = -8$ В в течение 4 ч уже не наблюдалось (см. рис. 2). Можно предположить, что заполнение водородом незаполненных связей уменьшает количество ловушек в объеме нитрида кремния, а реструктуризация поверхности вследствие отжига уменьшает количество поверхностных состояний. В результате, как мы полагаем, в значительной мере исчезает возможность для перемещения носителей заряда по ловушкам и накопления избыточного положительного заряда на поверхности нитрида кремния. Это, в конечном итоге, обуславливает долговременную стабильность порогового напряжения ИСПТ.

ВЫВОДЫ

На основании анализа полученных данных выдвинуто предположение о механизме наблюдаемой нестабильности электрических параметров исследуемых ИСПТ. Процесс может быть вызван наличием значительных структурных дефектов на поверхности нитрида кремния, и сопутствующих им «мелких» ловушек заряда, что может приводить к постепенному смещению локализованного положительного заряда к границе раздела с электролитом при продолжительном воздействии открывающего напряжения.

Установлено, что такие изменения имеют обратимый характер, однако вносимые ими искажения могут быть нежелательными при проведении длительных непрерывных измерений. Показано, что отжиг кристаллов в водороде значительно

уменьшают дрейф порогового напряжения и таким образом улучшают стабильность ИСПТ-датчиков, что происходит за счет пассивации незаполненных связей и реструктуризации поверхностных дефектов диэлектрика.

Показано, что при конструировании ИСПТ и разработке соответствующей аппаратуры контроля желательнее использовать такие режимы включения приборов, при которых к затвору транзистора прикладывалось бы минимально возможное напряжение. С этой точки зрения предпочтительными являются транзисторы со встроенным каналом.

Работа выполнена при финансовой поддержке НАН Украины в рамках комплексной научно-технической программы «Сенсорні системи для медико-екологічних та промислово-технічних потреб», а также проекта УНТЦ № 4591.

**A.S. Pavlychenko, A.L. Kukla, Yu.V. Goltvianskyi,
V.M. Arkhylova, S.V. Dzyadevych, A.P. Soldatkin**

INVESTIGATION OF STABILITY OF CHARACTERISTICS OF THE pH-SENSITIVE FIELD EFFECT TRANSISTORS

The drift of transfer characteristics and threshold voltage of the *p*-channel ion-selective field-effect transistors with induced channel, caused by long-term continuous influence of negative voltage applied to the channel area through the two-layer SiO₂/Si₃N₄ gate dielectric has been investigated. Based on the experimental data a mechanism of the observed instability is proposed. It is shown that annealing in hydrogen at the final stage of sensors manufacturing improves the stability of their characteristics.

Keywords: ion-selective field effect transistor (ISFET), silicon nitride, threshold voltage, drift.

1. Тернер Э. Биосенсоры: основные приложения. — М.: Мир, 1992. — 614 с.
2. Bergveld P. ISFET, Theory and Practice // IEEE Sensor Conference. — Toronto, Canada, Oct. 2003. — P. 1—26.
3. Bergveld P. Thirty years of ISFETOLOGY — What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years // Sensors and Actuators, B. — 2003. — **88**. — P. 1—20.
4. Jimenez-Jorquera C., Orozco J., Baldi A. ISFET Based Microsensors for Environmental Monitoring // Sensors. — 2010. — **10**. — P. 61—83.
5. Bergveld P. Development of an ion-sensitive solid-state device for neurophysiological measurements // IEEE Trans. Biomed. Eng. — 1970. — **17**. — P. 70—71.
6. Matsuo T., Wise K.D. An integrated field effect electrode for biopotential recording // Ibid. — 1974. — **21**. — P. 485—487.
7. Yates, D.E., Levine, S., Healy, T.W. Site-Binding Model of the Electrical Double Layer at the Oxide/Water Interface // J. Chem. Soc. Faraday Trans. — 1974. — **70**. — P. 1807—1819.
8. Meixner L.K., Koch S. Simulation of ISFET operation based on the site-binding model // Sensors and Actuators, B. — 1992. — **6**, N 1—3. — P. 315—318.
9. van Hal R.E.G., Eijkel J.C.T., Bergveld P. A novel description of ISFET sensitivity with the buffer capacity and double-layer capacitance as key parameters // Sensors and Actuators, B. — 1995. — **24—25**. — P. 201—205.
10. Harame D.L., Bousse L. et al. Ion-sensing devices with silicon nitride and borosilicate glass insulators // IEEE Trans. El. Dev. — 1987. — **ED-34**, N 8. — P. 1700—1707.
11. Hackley V.A., Malghan S.G. The surface chemistry of silicon nitride powder in the presence of dissolved ions // J. Mater. Sci. — 1994. — **29**. — P. 4420—4430.
12. Akiyama T., Ujichira Y. et al. Ion-sensitive FET with inorganic gate oxide for pH sensing // IEEE Trans. El. Dev. — 1982. — **ED-29**, N 12. — P. 1936—1941.
13. Sui W., Cobbold R. Basic properties of the electrolyte-SiO₂-Si system: Physical and theoretical aspects // Ibid. — 1979. — **ED-26**, N 11. — P. 1805—1815.
14. Yu G.T., Yen S.K. Hydrogen ion diffusion coefficient of silicon nitride thin films // Appl. Surf. Sci. — 2002. — **202**. — P. 68—72.
15. Kühnhold R., Ryssel H. Modeling the pH response of silicon nitride ISFET devices // Sensors and Actuators, B. — 2000. — **68**. — P. 307—312.
16. Zu C. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984. — Т. 1. — 455 с.
17. Breed D.J., Kramer R.P. Charge trapping in MOS systems // Thin Solid Films. — 1972. — **13**, N 1. — P. 1—4.
18. Yun B.H. Electron and hole transport in CVD Si₃N₄ films // Appl. Phys. Lett. — 1975. — **27**. — P. 256.

19. *Poghossian A.A.* Determination of the pH_{pzc} of insulators surface from capacitance-voltage characteristics of MIS and EIS structures // *Sensors and Actuators. B.* — 1997. — **44**, N 1—3. — P. 551—553.
20. *Структура* и оптические свойства сформированных с применением низкочастотного плазмохимического осаждения пленок SiH_x:H, содержащих нанокластеры кремния / Т.Т. Корчагина, Д.В. Марин, В.А. Володин, А.А. Попов и др. // *ФТП.* — 2009. — **43**, вып. 11. — С. 1557—1563.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева
НАН Украины
Проспект Науки 41,
03028 Киев

Получено 05.04.2010