

УДК 621.382.323; 621.315.592.4

К. ф.-м. н. А. Л. КУКЛА, С. В. ЛОЗОВОЙ,  
А. С. ПАВЛЮЧЕНКО, к. х. н. С. Н. НАГИБИН<sup>1</sup>

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ;

<sup>1</sup>ГП «Укрметртестстандарт»

E-mail: kukla@isp.kiev.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ рН-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

*Исследованы полупроводниковые первичные электроды на основе двойных рН-чувствительных полевых транзисторов при работе как в режиме определения величины рН исследуемых растворов, так и в дифференциальном режиме измерения сенсорных откликов. Для измерения откликов реализована упрощенная трехэлектродная конфигурация датчика. Показано, что по параметрам точности, воспроизводимости и стабильности измерений электроды удовлетворяют требованиям типовых применений.*

*Ключевые слова:* ионоселективный полевой транзистор, рН-ПТ-электрод, рН-чувствительность, метрологические параметры.

Открытие Бергвельдом в 1970 г. ионной чувствительности структуры «электролит — диэлектрик — кремний» [1] и создание на ее базе первого твердотельного ион-чувствительного электрода положило начало развитию нового класса миниатюрных полупроводниковых датчиков на основе ионоселективных полевых транзисторов (ИСПТ). Их преимуществами являются малые размеры, высокое быстродействие и возможность массового производства по микроэлектронной технологии. Такие датчики, как полностью твердотельные первичные преобразователи ионной концентрации в электрический сигнал, можно поточно изготавливать на технологических линиях по производству МДП-транзисторов, что обеспечивает их дешевизну и незначительный разброс характеристик. Конструкция кристаллов ИСПТ формируется методом фотолитографии и при необходимости может легко варьироваться. Подобные датчики могут успешно применяться для работы в жидких и газообразных средах. В настоящее время твердотельные преобразователи на основе полупроводниковых структур, в частности рН-чувствительных полевых транзисторов (рН-ПТ) [1–3], в определенной мере являются альтернативой стеклянным ион-чувствительным электродам как в обычной рН-метрии, так и для ряда специальных применений, включая анализ активности ионов разных типов с использованием ионофоров [1]. Например, указанные выше важные преимущества рН-ПТ позволяют использовать их как первичные датчики для химических и биологических сенсорных устройств, основанных на биохимических методах анализа с использованием специфических каталитических реакций [2–5]. В ряде предыдущих работ [6, 7] нами были описаны рН-чув-

ствительные электроды, разработанные на основе двойных р-канальных кремниевых полевых транзисторов с диэлектрическим слоем оксида и нитрида кремния. Возможность использования изготовленных электродов, в том числе в дифференциальном режиме измерений, была широко опробована для экологического мониторинга [5, 6], контроля качества продуктов питания [8] и биомедицинских исследований [9].

Чаще всего в качестве измерительного преобразователя для ИСПТ-датчиков используется схема слежения с отрицательной обратной связью, которая автоматически поддерживает ток канала ИСПТ на уровне выбранного значения [6, 10–13]. Схема реализована на базе электрометрического усилителя с ИСПТ, включенным в цепь обратной связи, и интегратора со смещенной общей точкой, выходной сигнал которого непосредственно используется для управления проводимостью канала ИСПТ. Несмотря на ряд преимуществ этой схемы (прямое отслеживание потенциала затвора ИСПТ, независимость от крутизны его переходной характеристики, возможность работы на нелинейном участке ВАХ), она имеет и существенные недостатки, основными из которых являются нестабильность и ограниченный диапазон выбора рабочей точки, сложность реализации симметричных прецизионных каскадов, переход в режим необратимого насыщения или осцилляции при потере контакта с раствором или электродом сравнения [6]. Кроме того, для корректной работы с такой схемой датчик должен иметь отдельные выводы для стоков и истоков каждого транзистора. В случае двоячного (дифференциального) датчика необходимо количество выводов составляет 5 (вместе с контактом к подложке).

Указанные недостатки схемы слежения можно устранить, если заменить ее схемой прямого измерения тока в канале транзистора [7]. Такая схема для дифференциальной пары транзисторов может быть реализована с использованием лишь одного источника стабильного напряжения, который является одновременно открывающим (напряжение «затвор — исток») и токообразующим (напряжение «сток — исток»). В этом случае дифференциальный электрод может иметь только три вывода, два из которых являются стоками транзисторов, а третий — объединенным выводом двух истоков и подложки. Таким образом, взяв за основу отклик ИСПТ по току, можно получить более простую измерительную систему как с конструктивной, так и со схемотехнической точек зрения, не ухудшив при этом ее рабочие параметры. В то же время, недостатком такого подхода остается невозможность раздельного регулирования управляющего напряжения для каждого из транзисторов, поэтому к идентичности характеристик обоих элементов дифференциальной пары предъявляются более жесткие требования.

С учетом сказанного, а также того, что разработанные рН-ПТ-электроды можно использовать в качестве первичных датчиков для точных измерений величины рН исследуемых растворов (а не только для биохимических экспериментов, в которых точность количественной интерпретации результатов измерений ограничивается методическими факторами), очевидна необходимость тщательного метрологического исследования основных характеристик электродов. К таким характеристикам относятся, прежде всего, передаточная характеристика рН-ПТ-электрода (т. е. зависимость тока от величины рН), стабильность электродов (временной дрейф тока и рН-чувствительности), величина гистерезиса и пределы погрешности при измерении величины рН растворов в диапазоне от 4 до 10.

Целью данной работы являлось изучение метрологических характеристик рН-ПТ-электродов, изготовленных в упрощенной конструкции, и сравнение их с известными характеристиками существующих средств измерения рН, а также оценка пригодности разработанных твердотельных датчиков для решения типовых задач рН-метрии с учетом требований регламентирующих нормативных документов [14, 15].

### Конструкция рН-чувствительного электрода

Топология полупроводникового транзисторного кристалла с двумя идентичными транзисторными элементами и конструкция собранного электрода показаны на **рис. 1**. Конструктивно-технологические особенности разработанных кристаллов и рН-ПТ-электродов на их основе подробно рассмотрены в [6, 7]. Транзисторный кристалл монтировали на печатную плату, их электрическое соединение осуществлялось с помощью

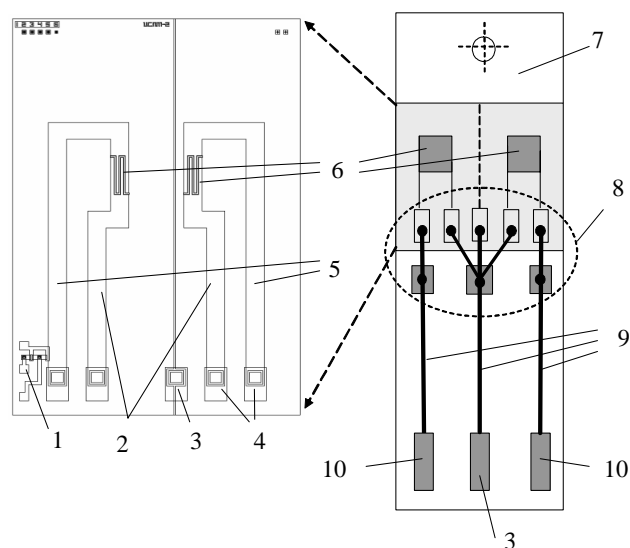


Рис. 1. Топология полупроводникового кристалла (а) и конструкция электрода (б):

1 — два тестовых МОП-транзистора с металлическими затворами; 2, 5 —  $p^+$ -диффузионные шины от областей истоков и стоков транзисторов соответственно; 3 — контакт к  $n$ -подложке (в центре), объединенный с выводами истоков транзисторов; 4 — алюминиевые контактные площадки к выводам транзисторов, выведенные на край кристалла; 6 — зигзагообразные области затворов; 7 — монтажная плата; 8 — область герметизации; 9 — печатные проводники; 10 — контакты к стокам транзисторов

ультразвуковой сварки, после чего области контактирования герметизировали изолирующим компаундом (рис. 1, б). Полученный электрод рассчитан на установку в специально изготовленную измерительную кювету. Как уже указывалось, была предложена конструкция электродов с тремя выводами для упрощения коммутации с вторичными измерительными преобразователями, построенными на базе схемы прямого измерения токов в каналах транзисторов.

### Эксперимент

Для измерения характеристик датчиков использовали поверенные приборы с известными метрологическими параметрами, собранные в измерительную установку, блок-схема которой показана на **рис. 2**. Для формирования управляющих напряжений датчиков использовали лабораторный блок питания Matrix MPS 3003L-3; напряжения и токи измеряли с помощью мультиметра FLUKE 287. В качестве тестовых растворов использовали стандартные буферные растворы Hamilton DuraCal со значениями рН 4,01, 7,00, 10,01  $\pm 0,01$  и дополнительные буферы со значениями рН 5,55, 8,37  $\pm 0,02$ , температура среды поддерживалась на уровне 24  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Было исследовано 20 датчиков без специальной обработки поверхности и 80 датчиков после очистки чувствительной поверхности хромовой смесью (использовали 0,1 М раствор дихромата калия и 50% серной кислоты).

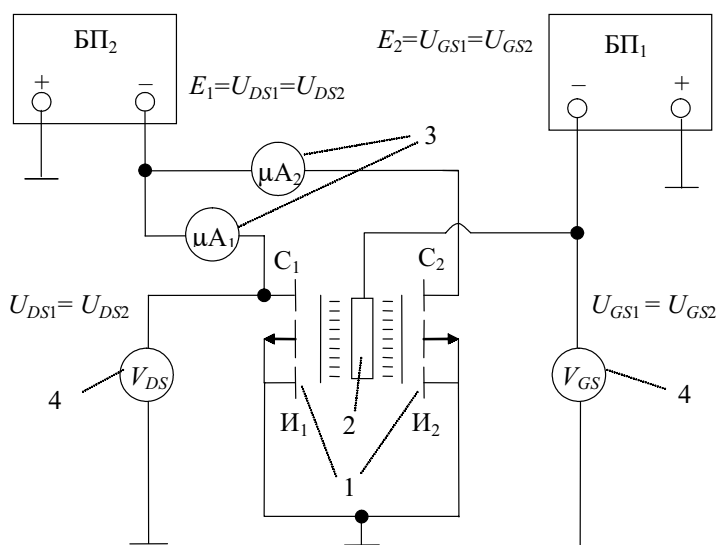


Рис. 2. Схема исследования параметров рН-ИТ-электрода: БП<sub>1</sub> и БП<sub>2</sub> — блоки питания; 1 — исследуемые транзисторные элементы; 2 — стандартный хлорсеребряный электрод сравнения; 3 — микроамперметры; 4 — вольтметры

Переходные вольт-амперные характеристики (ВАХ) датчиков (зависимость тока стока  $I_{DS}$  от напряжения «затвор — исток»  $U_{GS}$ ) в диапазоне  $-0,5...-4$  В измерялись при фиксированном напряжении «сток — исток»  $U_{DS}$ , равном  $-5$  В. Пороговое напряжение рассчитывалось из квадратичной аппроксимации ВАХ каждого датчика при рН=7,00, а проводимость канала — из ее кусочно-линейной аппроксимации в диапазоне  $350-650$  мкА.

рН-чувствительность датчиков рассчитывалась из линейной аппроксимации значений токов каналов для трех буферных растворов (рН 4,01,

7,00 и 10,01) для рабочей точки  $I_{DS} = 500$  мкА при рН=7,00.

Дрейф выходного токового сигнала каждого канала датчика и разницу между ними (дифференциальный отклик) определяли в течение 1,5 часов в буферном растворе рН=7,00 при фиксированных управляющем и питающем напряжениях.

Значения полученных параметров датчиков приведены в таблице.

Отметим, что обработка поверхности электродов хромовой смесью в целом позитивно влияет на их характеристики: несколько увеличивается рН-чувствительность (на  $3-7$  мкА/рН), а в ряде случаев значительно уменьшается разница токов в каналах. Это может быть объяснено двумя факторами: во-первых, химическая обработка удаляет загрязнения диэлектрической поверхности, которые могут влиять на пороговое напряжение и крутизну переходной характеристики; во-вторых, обработка в сильнокислой

среде может способствовать протонированию поверхности нитрида, что в свою очередь уменьшает время реакции датчика при резких изменениях рН, соответственно уменьшается погрешность измерения, обусловленная динамикой отклика.

Метрологическое исследование рН-ИТ-электродов включало четыре последовательных серии измерений. В процессе каждой серии выполнялись измерения тока в стандартных растворах пяти номинальных значений рН, равномерно распределенных в диапазоне  $4-10$ . Значение тока считывали через 5 минут после начала каждого измерения для уменьшения погрешно-

Основные технические параметры рН-ИТ электродов и влияние на них начальной очистки поверхности с помощью хромовой смеси

Название параметра	Значение параметра для электродов	
	необработанных	обработанных
рН-чувствительность по напряжению, мВ/рН	32–34	36–40
рН-чувствительность по току, мкА/рН	28–31	33–35
Проводимость, мкА/В (в диапазоне рабочих токов 350–650 мкА)	867–896	877–920
Пороговое напряжение, В	1,52–1,64	1,58–1,66
Напряжение рабочей точки, В (при $I_{DS} = 500$ мкА)	2,61–2,75	2,66–2,75
Дрейф тока, мкА/ч	2–6 (2,2–6,7) мВ/ч * $\Delta$ рН = 0,06–0,17 *	
Дрейф разницы токов обоих каналов, мкА/ч	0,34–1,22 (0,4–1,4) мВ/ч * $\Delta$ рН = 0,01–0,04 *	

\* Пересчитаны из рН-чувствительности по току

сти вследствие дрейфа рабочей точки, который обычно присутствует в ИСПТ [16–18].

Для определения величины гистерезиса измерения проводили в три прохода: последовательно в направлении от 4 до 10 рН, потом в обратном направлении и снова в прямом. Для определения долговременной стабильности электродов в последующих трех сериях через каждые две недели выполнялись троекратные измерения тока для каждой рН-точки. Было проведено также два дополнительных измерения по такой же методике по прошествии более двух месяцев после основного исследования. Между измерениями сухие электроды сохраняли на воздухе.

Начальную рабочую точку устанавливали в буферном растворе с рН=7,00, регулируя напряжение «затвор – исток» через хлорсеребряный электрод сравнения с помощью источника питания БП<sub>1</sub>, добываясь значения тока канала на уровне 500±5 мкА. Для всех исследуемых образцов управляющее напряжение находилось

в диапазоне –2,4...–2,8 В. Напряжение «сток – исток (подложка)» источника питания БП<sub>2</sub> фиксировалось на уровне –5 В, тем самым обеспечивалось функционирование полевых транзисторов в режиме насыщения.

В рамках детального метрологического исследования рассматриваемые рН-ПТ-электроды было решено анализировать по таким параметрам, как:

- коэффициент преобразования (рН-чувствительность) каждого рН-ПТ-элемента в заданном диапазоне рН и его долговременная стабильность. При этом передаточная характеристика рН-ПТ-элемента, на основе которой рассчитывается рН-чувствительность, может представляться как линейной, так и квадратичной аппроксимирующей функцией;
- расхождение измеренных значений рН между обоими каналами для средней точки диапазона рН=7,00;
- неравномерность расхождения измеренных значений рН между обоими каналами в заданном диапазоне рН;
- средний и максимальный гистерезис характеристик преобразования в указанных точках диапазона;
- погрешность определения величины рН исследуемого раствора по известной передаточной характеристике электрода.

### Результаты и обсуждение

Указанные выше метрологические параметры определялись по передаточным характеристикам рН-ПТ-электрода. На рис.3 представлены такие типовые характеристики для исследуемого диапазона рН вместе с аппроксимирующими кривыми квадратичного и линейного вида. Как видно, квадратичная аппроксимация достаточно точно ложится на экспериментальные точки с коэффициентом детерминации  $R^2$ , практически равным единице. Аппроксимация же линейной функцией не очень точна, поэтому для точных измерений по линейной калибровочной зависимости необходимо ограничивать исследуемый диапазон значениями рН 4–8,5. Как видно на вставке, в этом случае величина коэффициента детерминации существенно повышается.

рН-чувствительность датчика вычислялась как производная характеристики преобразования. На рис.4 приведены такие зависимости, полученные на протяжении четырех месяцев. Исходные данные для расчета этих кривых брались как усредненные значения для набора из 10 датчиков. Долговременная стабильность датчика определялась как зависимость величины его рН-чувствительности от времени (она представлена на вставке к рис. 4).

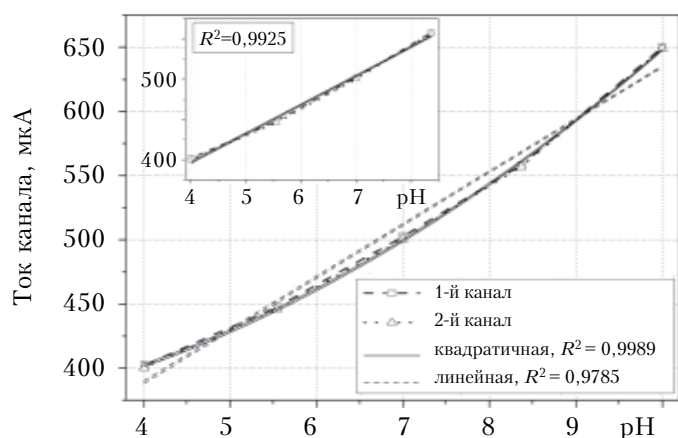


Рис. 3. Характеристики преобразования рН-ПТ-электрода и их квадратичная и линейная аппроксимации (на вставке – линейная аппроксимация в диапазоне рН 4–8,5)

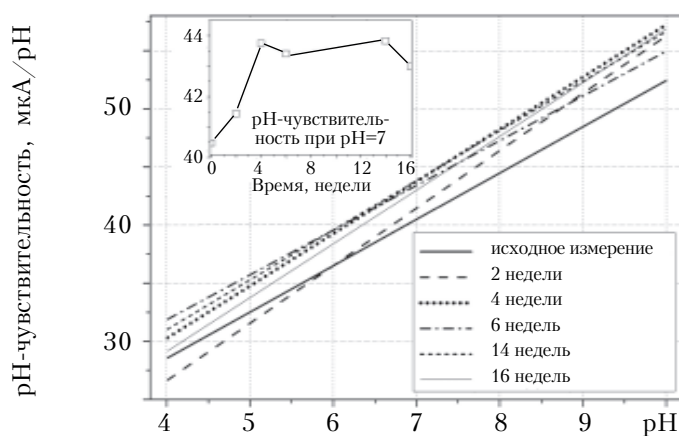


Рис. 4. рН-чувствительность датчика, рассчитанная по квадратичной аппроксимирующей функции, и ее стабильность на протяжении 16 недель слежения (на вставке)

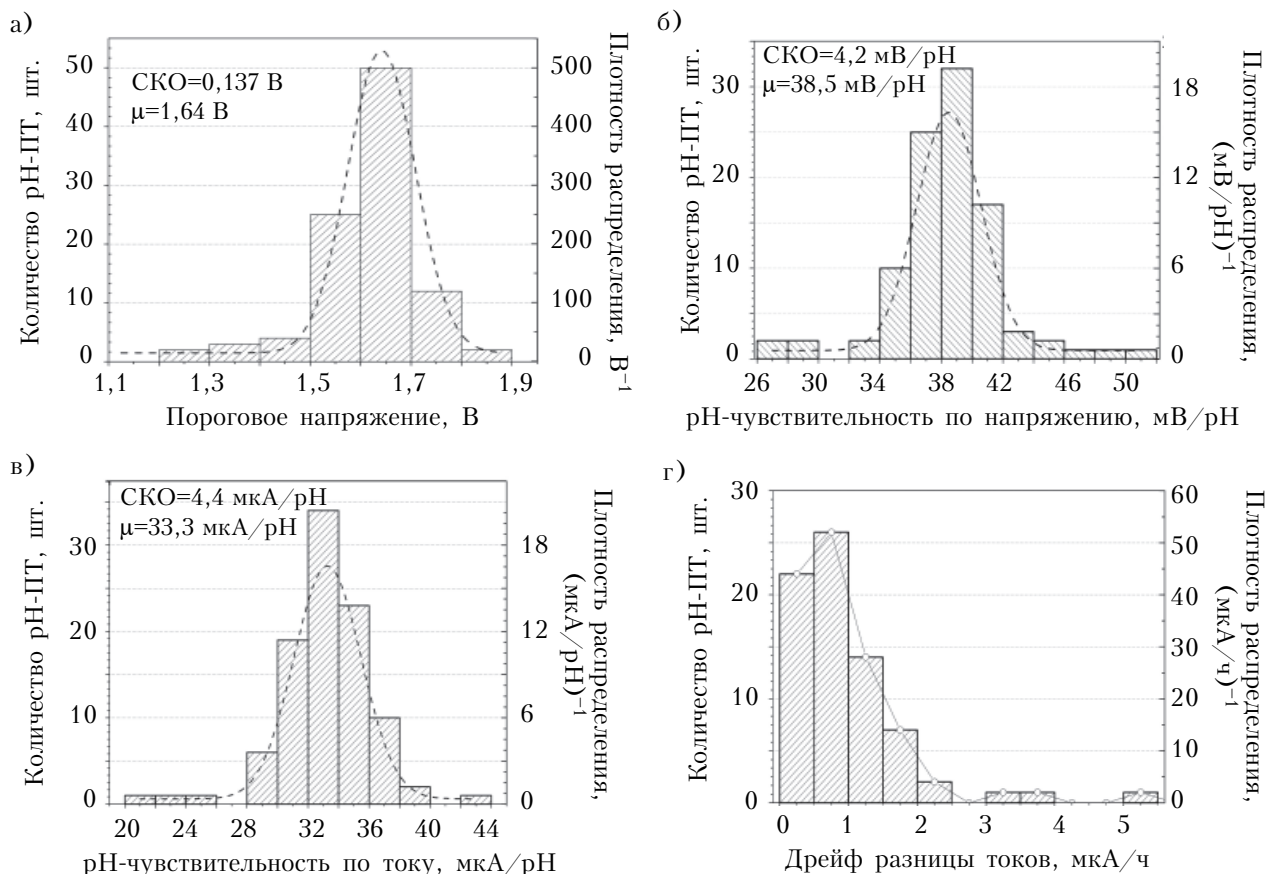


Рис. 5. Гистограммы распределения количества рН-ПТ-электродов по четырем параметрам для 100 исследованных образцов:  
*а* – пороговое напряжение при рН=7,00; *б* – рН-чувствительность по напряжению для линейной аппроксимации передаточных характеристик в диапазоне рН=4–8,5; *в* – рН-чувствительность по току; *г* – дрейф разницы токов между обоими рН-ПТ-элементами на кристалле

По результатам измерений видно, что рН-чувствительность исследуемых датчиков за более чем 4 месяца хранения и периодических наблюдений, по крайней мере, не снижалась. Следует отметить, что до начала проведения этих измерений электроды, после первоначальной их обработки хромовой смесью, хранились около полугода в воздушной среде. Таким образом, можно говорить о возможности долговременного сохранения начальной калибровочной характеристики, которая была измерена при фиксированной температуре. При измерениях таким электродом необходима только текущая установка его начальной рабочей точки  $I_{DS} = 500$  мкА на стандартном буферном растворе рН=7,00.

На рис.5 приведены распределения количества рН-ПТ по экспериментальным значениям различных параметров, полученные из измерений 100 исследованных образцов. Для каждого параметра указаны значения его математического ожидания  $\mu$  и среднеквадратического отклонения (СКО).

Как видно из гистограммы на рис. 5, *а*, значения пороговых напряжений исследованных об-

разцов лежат в пределах  $-1,5...-1,8$  В со средним значением 1,64 В. На этом рисунке, как и на следующих, приведена также кривая нормального распределения Гаусса, рассчитанная на основе среднего значения и среднеквадратического отклонения экспериментальных значений параметра. Следует отметить, что полученные экспериментальные распределения близки к нормальному, что типично для используемого технологического процесса изготовления транзисторных кристаллов.

На рис. 5, *б* показано распределение рН-чувствительности по напряжению (характерное для затворного диэлектрика  $Si_3N_4$ ), которое было пересчитано из рН-чувствительности по току (рис. 5, *в*) и электропроводимости канала для каждого образца рН-ПТ. Среднее значение рН-чувствительности (38,5 мВ/рН), хотя и далеко от Нернстового (59,2 мВ/рН при 25°C), однако достаточно стабильно при долговременном хранении, о чем свидетельствуют данные рис. 4.

Как видно из рис. 5, *г*, дрейф разницы токов, который является весьма важным параметром в дифференциальном режиме измерений,

для большинства рН-ПТ-электродов не превышает 1 мкА/ч. Поскольку этот дрейф обычно имеет ненаправленный случайный характер, можно подсчитать среднюю неопределенность измерения откликов в дифференциальном режиме. При средней рН-чувствительности по току, равной примерно 33 мкА/рН (рис. 5, в), эта неопределенность будет равна 0,03 рН, что удовлетворяет требованиям большинства биохимических и других лабораторных исследований.

Приведенные типовые распределения порогового напряжения, рН-чувствительности по напряжению и току, а также диапазоны рабочих напряжений и значения проводимости рН-ПТ для линейного участка ВАХ (см. таблицу) характеризуют технические параметры электрода, необходимые для определения требований к характеристикам вторичного измерительного преобразователя (ВИП). С помощью этих данных можно, с одной стороны, точнее подобрать диапазон управляющих напряжений и уменьшить шаг регулирования схемы цифро-аналогового преобразования, с другой стороны, оптимизировать динамический диапазон измеряемых токов рН-ПТ по критериям увеличения разрешающей способности и уменьшения разрядности АЦП. Тем самым можно достичь высокой точности ВИП, уменьшая стоимость комплектующих.

Для многих практических приложений очень важным является режим дифференциальных измерений для симметричной пары транзисторов, один из которых используется как референсный (отсчетный), а другой выполняет роль активного чувствительного элемента (например, с нанесенной на него хемо- или биоселективной мембраной). Этот режим позволяет существенно улучшить чувствительность анализа благодаря

подавлению в разностном сигнале синфазных помех, которые возникают вследствие воздействия различных внешних факторов (освещения, температуры, электромагнитных полей) или свойств исследуемого раствора (ионной силы, буферной емкости раствора и величины его рН). В то же время, как уже было отмечено, особенностью схемы подключения дифференциального рН-ПТ-датчика (см. рис. 2) для одновременного измерения тока в обоих каналах является то, что управление напряжением  $U_{GS}$  для них совершается нераздельно [7], и поэтому характеристики обоих транзисторов должны быть максимально близкими. При значительном же разбросе этих параметров нарушается симметричность каналов, что приводит к увеличению погрешности измерений откликов в дифференциальном режиме. Поэтому в число исследуемых характеристик были внесены параметры симметричности обоих транзисторных каналов.

Более детальный перечень полученных метрологических характеристик исследованных рН-ПТ-электродов, которые важны для их практического использования в сенсорных устройствах, следующий: максимальная погрешность определения рН по линейно аппроксимированным функциям — не более 0,01 рН (в диапазоне рН 4–8,5), по квадратичным — 0,05 рН (в диапазоне рН 4–10); максимальный гистерезис параметров датчиков в полном диапазоне рН — не более 0,3 рН (в среднем он составлял 0,15–0,2 рН); максимальная относительная разность функций преобразования обоих каналов дифференциального датчика в диапазоне 4–10 рН — не более 2–3%. Таким образом, параметры разработанных электродов удовлетворяют требованиям к датчикам для сенсорных устройств и в целом

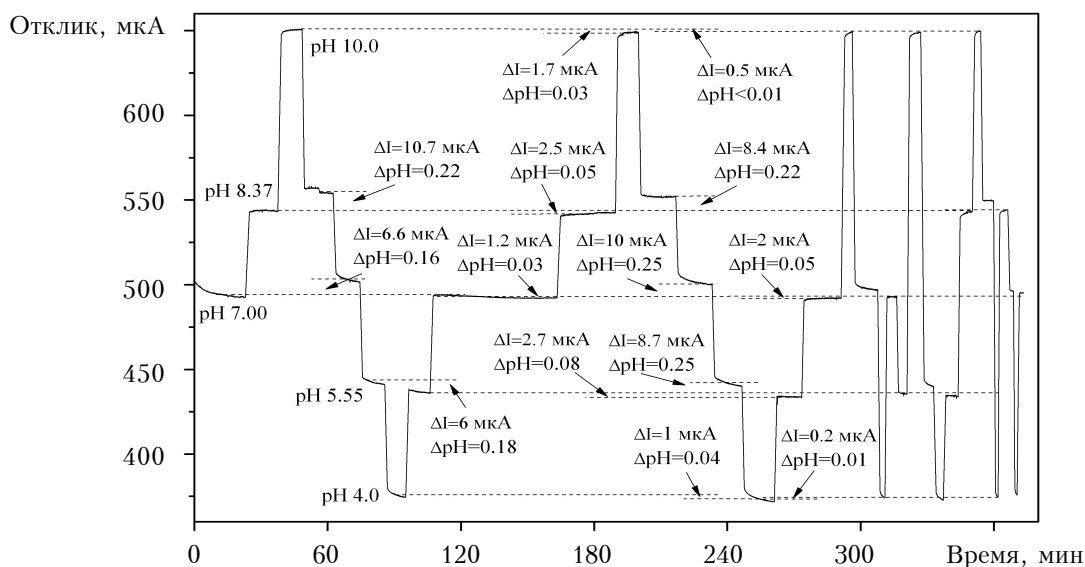


Рис. 6. Сенсограмма откликов типового рН-ПТ-электрода на изменение величины рН буферных растворов

соответствуют аналогичным параметрам существующих средств измерения на основе стандартных стеклянных рН-электродов [14, 15, 19, 20].

При тестовых измерениях откликов электродов в широком диапазоне величин рН была отмечена интересная особенность, связанная с их гистерезисным поведением. Для примера на **рис.6** показана диаграмма с откликом одного из каналов электрода на последовательное изменение величины рН раствора.

Как видно, наблюдался значительный гистерезис величиной 0,2–0,3 рН относительно исходных значений при измерениях от более высоких показателей рН к более низким. При измерениях же в обратном направлении гистерезис был намного меньшим. Этот факт можно использовать для восстановления предыдущего состояния электрода, проводя процедуру непродолжительной «промывки» в растворе с меньшим показателем рН. Исследования показали, что с помощью промывки электрода в буферном растворе с показателем рН=4 можно значительно уменьшить гистерезис до величины погрешности, близкой к 0,05 рН. Не исключено, что упомянутое улучшение характеристик датчика при обработке его сильным окислителем (хромовой смесью) и улучшение воспроизводимости отклика при обработке раствором с низким рН имеют в своей основе один и тот же физический механизм (протонирование поверхности нитрида кремния).

### Выводы

Исследования метрологических параметров разработанных электродов показали, что погрешность определения рН растворов отдельными рН-чувствительными полевыми транзисторами по калибровочным характеристикам в диапазоне рН 4–10 составляла 0,05–0,07 рН, что удовлетворяет требованиям большинства типовых лабораторных применений.

Исследованные рН-ПТ-электроды показали приемлемые параметры симметричности передаточных характеристик обоих транзисторов на одном кристалле, такие как неравномерность определения рН по диапазону (менее 0,01 рН) и расхождение определения рН между обоими каналами (менее 0,04 рН), что свидетельствует о пригодности разработанных электродов к использованию в дифференциальном режиме измерений без необходимости реализации отдельных цепей управления для каждого элемента дифференциальной пары.

Способность к долговременному сохранению исходной калибровочной характеристики электрода позволяет при последующих измерениях проводить только текущую установку начальной рабочей точки электрода в стандартном буферном растворе со значением рН=7,0.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Bergveld P. ISFET, Theory and Practice // IEEE Sensor Conference. – Toronto (Canada). – 2003. – P. 1–26.
2. Тернер Э. Биосенсоры: основные приложения. – Москва: Мир, 1992. [Turner E. Biosensory: osnovnyye prilozheniya. Moskva: Mir, 1992]
3. Electrochemical sensors, biosensors and their biomedical applications / Ed. by Zhang X., Ju H., Wang J. – Elsevier, Academic Press, 2008.
4. Borstlap D. High-k dielectrics as bioelectronic interface for field-effect transistors / Ph.D Thesis. – Julich, Institut fur Bio- und Nanosysteme. Bioelektronik. – 2007.
5. Dzyadevych S.V., Soldatkin A.P., El'skaya A.V. et al. Enzyme biosensors based on ion-selective field-effect transistors // Analytica Chimica Acta. – 2006. – Vol. 568. – P. 248–258.
6. Кукла О. Л., Павлюченко О. С., Голтвянский Ю. В. та ін. Сенсорні масиви на основі диференціальних ІСПТ-елементів для моніторингу токсичних речовин природного та штучного походження // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2008. – № 2. – С. 58–68. [Kukla O. L., Pavlyuchenko O. S., Goltvyans'kii Yu. V. ta in. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. 2008. N 2. P. 58]
7. Павлюченко А.С., Кукла А.Л., Голтвянский Ю.В. Применение ионоселективных полевых транзисторов для ферментного анализа токсичных примесей в водных растворах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 3. – С. 35-46. [Pavlyuchenko A.S., Kukla A.L., Goltvyanskii Yu.V. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2010. N 3. P. 35]
8. Архипова В. М., Шелякина М. К., Кукла О. Л. та ін. Біосенсорний аналіз глікоалкалоїдів картоплі // Біотехнологія. – 2009. – Т. 2, № 3. – С. 64–73. [Arkhipova V. M., Shelyakina M. K., Kukla O. L. ta in. // Biotekhnologiya. 2009. Vol. 2, N 3. P. 64]
9. Марченко С. В., Назаренко О. А., Кукла О. Л. та ін. Розробка креатинін-чутливого біосенсора для медичного застосування // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. – 2009. – № 4. – С. 55–62. [Marchenko S. V., Nazarenko O. A., Kukla O. L., ta in. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. 2009. N 4. P. 55]
10. Hammond P. A., Ali D., Cumming D. R. S. Design of a single-chip pH sensor using a conventional 0.6- $\mu\text{m}$  CMOS process // IEEE Sensors Journal. – 2008. – Vol. 4(6). – P. 706–712.
11. Bausells J., Carrabina J., Errachid A., Merlos A. Ion-sensitive field effect transistors fabricated in a commercial CMOS technology // Sensors and actuators, B. – 1999. – Vol. 57. – P. 56–62.
12. Nakazato K. An integrated ISFET sensor array // Sensors. – 2009. – Vol. 9. – P. 8831–8851.
13. Ghallab Y. H., Badawy W., Karan K. A novel pH sensor using differential ISFET current mode read-out circuit // Proceed. of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS). – Canada, Banff, Alberta. – 2003.
14. Springer E.K. pH measurement utilizing glass electrodes: theory and practice. – Hamilton Company, 2006.

15. De Almeida N. H, Nohama P. Proposal of methodology and test protocol for evaluating and qualifying pH measuring devices // Brazilian Archives of Biology and Technology. — 2006. — Vol. 49. — P. 25–30.

16. Cui C., Cheung P. W., Yee S. An experimental study of instability of inorganic gate ISFETs // Sensors and Actuators, B. — 1990. — Vol. 1. — P. 421–424.

17. Pavluchenko A.S., Kukla A.L., Goltvianskyi Yu.V. et al. Investigation of stability of the pH-sensitive field-effect transistor properties // Sensor Letters. — Vol. 9, N 6. — 2011. — P. 2392–2396.

18. Jamasb S., Collins S. D., Smith R. L. A physical model for drift in pH ISFETs // Sensors and Actuators, B. — 1998. — Vol. 49. — P. 146–155.

19. Dybko A. Errors in chemical sensor measurements // Sensors. — 2001. — Vol. 1. — P. 29–37.

20. Wu Y. C., Koch W. F., Durst R. A. Standardization of pH measurements. — U. S. Department of Commerce: National Bureau of Standards, 1988.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 16.01 2013 г.

Kukla A.L., Lozovoy S.V., Pavluchenko A.S., Nagibin S.N. **Investigation of metrological parameters of sensors based on the pH-sensitive field effect transistors.**

*Keywords: ion-selective field effect transistor, pH-FET electrode, pH sensitivity, metrological parameters.*

Primary semiconductor electrodes based on the dual channel pH-sensitive field effect transistors were

investigated to characterize their performance both to determine pH value of test solution and to measure sensor responses in differential mode. The simplified three-lead sensor design has been implemented for these purposes. It is shown that such parameters as accuracy, repeatability and stability of developed sensors satisfy necessary requirements for typical laboratory applications.

Ukraine, Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of semiconductor physics of NAS of Ukraine, SE «Ukrmetrteststandart».

Кукла О. Л., Лозовий С. В., Павлюченко О. С., Нагібін С. Н. **Дослідження метрологічних параметрів датчиків на основі рН-чутливих польових транзисторів.**

*Ключові слова: іоноселективний польовий транзистор, рН-ПТ-електрод, рН-чутливість, метрологічні параметри.*

Досліджено напівпровідникові первинні електроди на основі подвійних рН-чутливих польових транзисторів при роботі як в режимі визначення величини рН досліджуваних розчинів, так і в диференціальному режимі вимірювання сенсорних відгуків. Для вимірювання відгуків реалізовано спрощену трьохелектродну конфігурацію датчика. Показано, що за параметрами точності, відтворюваності та стабільності вимірювань електроди задовольняють вимогам типових застосувань.

Україна, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ; ДП «Укрметрестандарт».

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Красников Г. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— Москва: Техносфера, 2011.**

В книге рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, описаны направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, представлены требования к подзатворным диэлектрикам, технологии их формирования, различные конструкции сток-истоковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрены проблемы влияния масштабирования размеров элементов в субмикронную область и особенности влияния технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов. Представлены данные о влиянии технологических процессов изготовления субмикронных СБИС (процессов плазменной обработки, ионного легирования и технологических операций переноса изображения) на деградацию подзатворного диэлектрика, а значит — на уровень выхода, надежность и долговечность годных готовых изделий. Книга предназначена для специалистов в области проектирования и разработки технологии изготовления КМОП СБИС, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

