

УДК 621.382.001.63

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ВАРИАНТ СОЗДАНИЯ БИС ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЕМКОСТЬ–НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

А.И. БЕЛОУС<sup>1</sup>, С.Е. ДРОЗД<sup>1</sup>, Е.В. КОННОВ<sup>1</sup>, Н.И. МУХУРОВ<sup>2</sup>, И.В. ГАСЕНКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТЦ Белмикросистемы" УП "Завод полупроводниковых приборов",  
Корженевского, 12, Минск, 220108, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси,  
пр. Независимости, 68, Минск, 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 14 апреля 2010

Рассматривается один из вариантов конструктивно-технологического построения и создания БИС преобразователя емкость–напряжение для электронной схемы миниатюрных микроэлектромеханических датчиков с емкостным выходом.

*Ключевые слова:* конструкция и технология построения, микроэлектромеханические датчики, преобразователь емкость–напряжение, интегральные схемы.

### Введение

Современные микроэлектромеханические системы (МЭМС), выполненные наподобие ИС, представляют собой сформированные на единой подложке датчики, актюаторы, схемы управления с размерами элементов от нескольких сотен до нескольких единиц микрон. Но в отличие от микросхем, МЭМС, как правило, имеют трехмерную структуру [1, 2]. Для их изготовления используют как соответствующим образом адаптированные технологические операции микроэлектроники: окисление, фотолитографию, травление, легирование, металлизацию, создание контактов, резку и т.п., так и специально разработанные. Например, сухое химическое анизотропное травление для формирования структур в гальванически выращенных толстых металлических слоях, процессы селективного травления в зависимости от концентрации примеси, а также метод анодной сварки или плавления для соединения пластин кремния. Базовым материалом для микроэлектромеханических приборов, как и для полупроводниковых, служит кремний [3]. Это объясняется его отличными механическими характеристиками, наличием на рынке кремниевых пластин высокой степени чистоты и кристаллографического совершенства, относительной простотой объединения МЭМС с электронными устройствами управления и обработки данных.

### Особенности схмотехнического и структурного решения преобразователя

В основу схмотехнического решения БИС с функцией измерения изменения емкостей дифференциального конденсатора (ДК) и преобразования их в постоянное напряжение были положены следующие основные требования: изменение выходного напряжения прямо пропорционально изменению емкостей обкладок чувствительных элементов (ЧЭ) от внешнего воздействия, отклонение от опорного напряжения в "+" или "-" в зависимости от знака направления воздействия, напряжение питания — однополярное  $U_{CC}=5\text{ В}\pm 10\%$ , диапазон рабочих температур от  $-40$  до  $+85^\circ\text{C}$ , номинальная емкость обкладок ДК в пределах 1–100 пФ, типовое изменение емкостей — до  $\pm 30\%$  на обкладку в момент максимальных воздействий [4]. Исходя из это-

го, предложена обобщенная структурная схема БИС ПЕН двухканального микромеханического сенсора с внешними опорным напряжением и интегрирующими емкостями в составе дифференциальных конденсаторов, включающая два идентичных канала, содержащих блоки формирования стабильного напряжения накачки, опорного напряжения, универсальный интегрирующий блок, выборки и хранения, выходного усилителя с изменяемым коэффициентом усиления и фильтром верхних частот, сервисных функций. Структурная схема двухканального микромеханического сенсора и условное графическое обозначение БИС ПЕН приведены на рис. 1, а в табл. 1, 2 приведены назначения выводов БИС ПЕН по обобщенной структурной схеме, и выполняемые функции в зависимости от кода по входам блока управления соответственно.

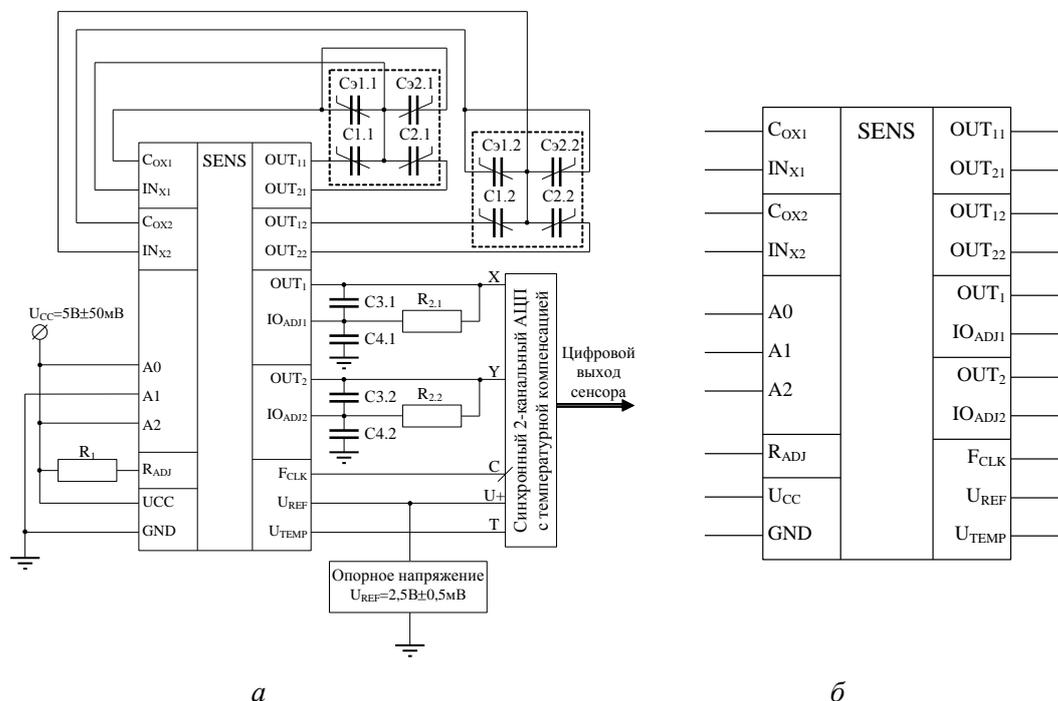


Рис. 1. Структурная схема двухканального микромеханического сенсора (а) и условное графическое обозначение БИС ПЕН (б)

Таблица 1. Назначение выводов БИС ПЕН

Наименование вывода	Назначение вывода	
1	$C_{OX1}$	Вход подключения внешней интегрирующей емкости 1-го канала
2	$C_{OX2}$	Вход подключения внешней интегрирующей емкости 2-го канала
3	$IN_{X1}$	Вход 1-го канала дифференциального конденсатора
4	$IN_{X2}$	Вход 2-го канала дифференциального конденсатора
5	$OUT_{11}$	Выход 1 накачки дифференциального конденсатора 1-го канала
6	$OUT_{12}$	Выход 1 накачки дифференциального конденсатора 2-го канала
7	$OUT_{21}$	Выход 2 накачки дифференциального конденсатора 1-го канала
8	$OUT_{22}$	Выход 2 накачки дифференциального конденсатора 2-го канала
9	$U_{OUT1}$	Вывод выходного напряжения 1-го канала
10	$U_{OUT2}$	Вывод выходного напряжения 2-го канала
11	$IO_{ADJ1}$	Вывод подключения резистора регулировки усиления 1-го канала
12	$IO_{ADJ2}$	Вывод подключения резистора регулировки усиления 2-го канала
13	$R_{ADJ}$	Вход подключения резистора регулировки тактовой частоты
14	A0	Вход 0-го разряда кода блока управления
15	A1	Вход 1-го разряда кода блока управления
16	A2	Вход 2-го разряда кода блока управления
17	$F_{CLK}$	Выход тактовой частоты для синхронизации внешних устройств
18	$U_{REF}$	Вход-выход опорного напряжения
19	$U_{TEMP}$	Выход напряжения температурного датчика
20	$U_{CC}$	Вывод напряжения питания
21	GND	Общий вывод

Таблица 2. Выполняемые БИС ПЕН функции

Входы блока управления			Выполняемая функция БИС
A0	A1	A2	
0	0	0	Режим с пониженным энергопотреблением
1	0	0	Нормальный режим работы (внутренние $U_{REF}$ и $C_0$ )
0	1	0	Работа в режиме с внешним $U_{REF}$
1	1	0	Резервный код
0	0	1	Работа в режиме с внешним $C_0$
1	0	1	Работа в режиме с внешним $U_{REF}$ и $C_0$
0	1	1	Резервный код
1	1	1	Режим тестирования

Для реализации предложенного схемотехнического решения был разработан конструктивно-технологический вариант БИС ПЕН.

### Выбор технологии изготовления БИС преобразователя емкость–напряжение

При выборе технологии изготовления БИС ПЕН основное внимание уделяется ее функциональному назначению и электрическим параметрам. Исходя из структурной схемы, микросхема должна выполнять функцию измерения весьма малых изменений емкости обкладок дифференциального конденсатора, выделения, усиления и преобразования в постоянное напряжение полезного сигнала с использованием интегральной схемотехники, рассчитанной на электрическое напряжение 5 В. Для решения поставленной задачи вполне подходит соответствующий КМОП технологический процесс.

Требования к вольтамперным характеристикам (ВАХ) элементной базы для микросхемы можно сформулировать исходя из особенностей ее функционального назначения, таких как:

- возможность построения аналоговых операционных усилителей (ОУ) в микроощном и мощном исполнении с полосой пропускания не хуже 5 МГц;
- высокие крутизна ВАХ и допороговые характеристики МОП транзисторов в аналоговом применении;
- наличие высокоомных резисторов с низким температурным уходом сопротивления;
- наличие конденсаторов, постоянных в диапазоне напряжений;
- возможность создания NPN биполярных транзисторов для построения датчика температуры кристалла;
- устойчивость к току защелкивания;
- обеспечение воспроизводимости и стабильности технологических параметров изготавливаемых микросхем.

С целью обеспечения требуемых ВАХ элементной базы выбраны проектные нормы с размерами 2,0 мкм и разработаны правила проектирования топологии. За основу взяты требования на проектирование топологии микросхем серии НС/НСТ производства НПО "Интеграл", к которым добавлены слои "Конденсатор" и "Резистор", выполненные в поликристаллическом кремнии (ПКК) второго уровня, что вызвано необходимостью формирования емкости, постоянной в диапазоне напряжений между первым и вторым уровнями поликремния и поликремниевого резистора  $p$ -типа с низким значением температурного коэффициента сопротивления. В элементную базу введен NPN биполярный транзистор, формируемый на КМОП слоях, эмиттером служит  $n^+$ -сток, базой —  $p$ -карман, коллектором — подложка  $n$ -типа, запитанная  $n^+$ -стоком. Размеры и зазоры основных топологических слоев БИС ПЕН представлены в табл. 3. Требования к основным ВАХ элементной базы микросхемы приведены в табл. 4. Особенности технологии изготовления микросхемы представлены в табл. 5.

Технологический маршрут изготовления БИС ПЕН содержит 12 фотолитографических операций, и типовая длительность изготовления пластин составляет 30 рабочих дней в производстве завода № 20 УП "Завод полупроводниковых приборов".

Конечные параметры структуры БИС ПЕН представлены на рис. 2 и в табл. 6, в которой отражены толщины пленок, глубины залегания примесей, поверхностные сопротивления технологических слоев.

Таблица 3. Размеры основных топологических слоев БИС ПЕН

Топологический слой	Элемент, мкм	Зазор, мкм	Шаг, мкм
Активная область	4,0	2,0	6,0
Затвор (поликремний первого уровня)	2,5	2,0	4,5
Резистор (поликремний второго уровня)	6,0	2,0	8,0
Контакты	2,2	2,3	4,5
Металл	6,2	2,3	8,5

Таблица 4. Требования к основным ВАХ элементной базы микросхемы

Параметр, единица измерения	<i>n</i> -канальный транзистор (2,5×50) мкм	<i>p</i> -канальный транзистор (2,5×50) мкм	<i>n</i> -канальный выходной транзистор (2,7×300) мкм	<i>p</i> -канальный выходной транзистор (2,7×300) мкм	Резистор ПКК-2, <i>p</i> -типа	Конденсатор ПКК1–ПКК2 на диэлектрике SiO <sub>2</sub> +Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Биполярный <i>n-p-n</i> -транзистор
Пороговое напряжение ( $I_c=100$ нА), В	0,4–0,8	0,5–0,9	0,4–0,8	0,5–0,9	–	–	–
Ток стока (при $U_c=U_3=5$ В), мА	5–10	1,8–3,2	$\geq 30$	$\geq 9$	–	–	–
Пробивное напряжение ( $I=10$ мкА), В	12–18	12–20	12–20	12–20	–	–	–
Поверхностное сопротивление, Ом/кв.	–	–	–	–	1200–1600	–	–
Удельная емкость, $10^{-4}$ пФ/мкм <sup>2</sup>	–	–	–	–	–	5,6–5,8	–
Коэффициент усиления ( $I_6=10$ мкА)	–	–	–	–	–	–	$\geq 10$

Таблица 5. Особенности технологии изготовления микросхемы

Параметр	Особенности технологии
Технология	2-х карманный самосовмещенный КМОП процесс
Проектная норма	2,0 мкм
Подложка	<i>n</i> -тип, концентрация примеси $N=10^{15}$ см <sup>-3</sup>
Изоляция	Locos
Подзатворный диэлектрик	SiO <sub>2</sub> , $d=(42,5\pm 2,5)$ нм
Затвор (поликремний первого уровня)	ПКК-1, <i>n</i> -типа
Транзисторы	Классический <i>n</i> -МОП Классический <i>p</i> -МОП Мощный выходной <i>n</i> -МОП Мощный выходной <i>p</i> -МОП
Резистор (поликремний второго уровня)	ПКК-2, <i>p</i> -типа
Конденсаторный диэлектрик	SiO <sub>2</sub> +Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Межслойный диэлектрик	Борофосфорное силикатное стекло (БФСС)
Металлизация	Al+Si+Cu+Ti
Пассивация	Плазмо-химический окисел (ПХО)

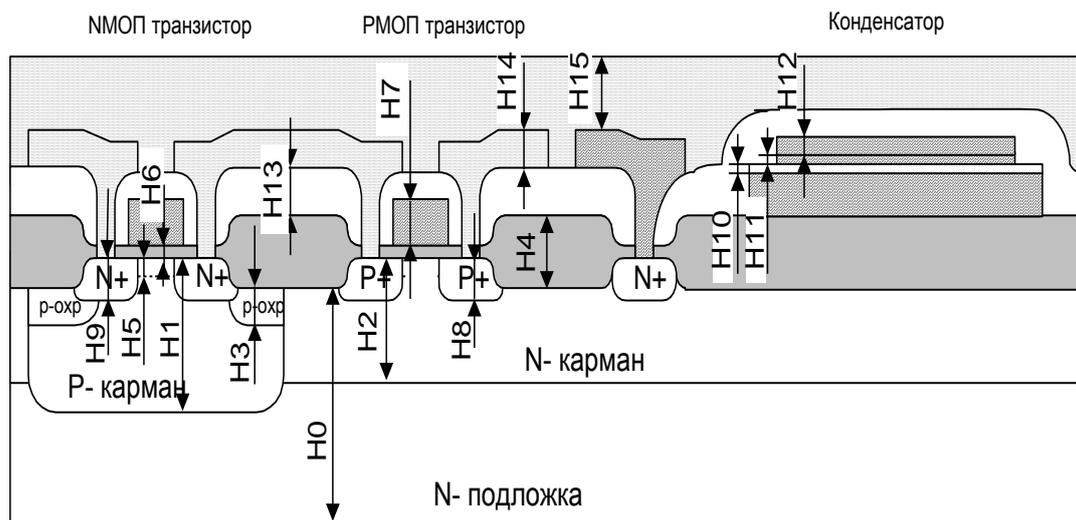


Рис. 2. Конечные параметры структуры микросхемы БИС ПЕН

Таблица 6. Конечные параметры структуры микросхемы

Элементы структуры				Поверхностное сопротивление, $R_s$ , Ом/кв.	Предельное отклонение вскрытых областей, мкм
Название	Обозначение	Толщина, мкм	Тип проводимости		
Подложка	H0	460±20	<i>n</i>	–	–
<i>p</i> -карман	H1	7,0±1,4 <sup>1)</sup>	<i>p</i>	2000±400 <sup>1)</sup>	±0,25
<i>n</i> -карман	H2	6,5±1,3 <sup>2)</sup>	<i>n</i>	1000±200 <sup>2)</sup>	–
Охрана $p^+$	H3	1,2±0,24 <sup>1)</sup>	<i>p</i>	2500±500 <sup>1)</sup>	±0,2 <sup>3)</sup>
Окисел локальный	H4	0,8±0,05 <sup>4)</sup>	–	–	–
Подлегирование канала	H5	–	<i>p</i>	–	±0,2 <sup>3)</sup>
Окисел подзатворный	H6	0,0425±0,0025	–	–	–
Затвор (ПКК-1)	H7	0,43±0,05	<i>n</i>	18±8 <sup>1)</sup>	±0,2
<i>p</i> -стоки	H8	0,45±0,09 <sup>1)</sup>	<i>p</i>	200±40 <sup>1)</sup>	±0,2 <sup>3)</sup>
<i>n</i> -стоки	H9	0,45±0,09 <sup>1)</sup>	<i>n</i>	25±10 <sup>1)</sup>	±0,2 <sup>3)</sup>
Конденсаторный диэлектрик	SiO <sub>2</sub>	H10	0,015 ± 0,003 <sup>2)</sup>	–	–
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	H11	0,045 ± 0,05	–	–
Конденсатор (ПКК-2)	H12	0,27±0,02	<i>p</i>	1400±200	±0,2
Окисел межслойный	H13	0,8±0,08 <sup>4)</sup>	–	–	–
Металлизация	H14	1,1±0,1	–	–	±0,4
Пассивация	H15	1,5±0,25	–	–	–

<sup>1)</sup> Величины параметров обеспечиваются инструментом.  
<sup>2)</sup> Величины параметров контролируются на этапе формирования (на спутниках).  
<sup>3)</sup> Предельные отклонения вскрытых областей указаны для операции "Контроль проявления".  
<sup>4)</sup> Толщина после наращивания, конечная толщина: H4 —  $d \text{ SiO}_2 > 0,55$  мкм, H13 —  $d \text{ БФСС} > 0,65$  мкм

Области применения микромеханических сенсоров ускорений с подвижным чувствительным элементом в виде дифференциального конденсатора можно, в общем виде, распределить по диапазонам контролируемых ускорений:

- до 2 *g* — контроль углов наклона зданий и промышленных объектов, плоскостность железнодорожных путей, мостов и тому подобное;
- до 10 *g* — автомобильная техника, разнообразные подушки безопасности, плавность хода железнодорожного транспорта;
- до 15 *g* — авиационная техника;
- 100 *g* — датчики детонации в ДВС и сейсмодатчики;
- 1000 *g* — вооружение.

Наличие в БИС ПЕН двух идентичных каналов позволяет реализовать двухкоординатные (X/Y) датчики угла наклона и курсовертикали.

То обстоятельство, что дифференциальный конденсатор может выполняться не как классический с центральным подвижным элементом, а в виде двух отдельных конденсаторов

как "зонд–эталон" с различными диэлектриками между обкладками, позволяет на основе рассматриваемого микромеханического сенсора общего назначения создавать эффективные датчики влажности.

При выполнении центрального элемента дифференциального конденсатора в виде мембраны возможно создание датчиков давления.

### **Заключение**

Предложен один из конструктивно-технологических вариантов построения БИС преобразователя емкость–напряжение для микроэлектромеханических датчиков общего назначения с чувствительным элементом в виде дифференциального конденсатора. Разработанный вариант может послужить прототипом для построения разнообразных микромеханических сенсоров с чувствительными элементами емкостного типа.

## **CONSTRUCTIVE-TECHNOLOGICAL VARIANT OF CONSTRUCTION OF CAPACITY VOLTAGE CONVERTER LSIC FOR MEMS SENSORS**

A.E. BELOUS, S.E. DROZD, E.V. KONNOV, N.I. MUKHUROV, I.V. GASENKOVA

### **Abstract**

One of variants of constructive-technological construction and creation capacity-voltage converter LSIC for electronic circuit of general application MEMS miniature sensor with capacitive output is examined.

### **Литература**

1. *Иванов А.А., Мальцев П.П., Телец В.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 1. С. 2–12.
2. MEMS market to reach \$12.5 billion by 2010 // Military & Aerospace Electronics. 2006. July.
3. *Мухуров Н.И.* Алумооксидные микро-наноструктуры для микроэлектромеханических систем. Минск, 2004.
4. *Белюс А.И., Емельянов В.Е., Дрозд С.Е. и др.* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 8. С. 15–19.