

К. т. н. В. Г. ВЕРБИЦКИЙ, к. т. н. В. И. ЗОЛОТАРЕВСКИЙ,  
к. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО, Л. И. САМОТОВКА,  
Е. С. ТОВМАЧ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов  
E-mail:

Дата поступления в редакцию  
30. 01 2001 г.

Оппонент к. т. н. М. Д. КАРДАЩУК

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КМОП ИС КЛЮЧЕЙ И КОММУТАТОРОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНОГО КРЕМНИЯ

*Показаны возможность и особенности применения объемного кремния при проектировании и освоении в производстве КМОП ИС ключей, коммутаторов.*

В условиях, когда зарубежные производители и поставщики предлагают широкий спектр КМОП интегральных схем, различных по функциональному назначению, с широким диапазоном допустимых электрических и температурных воздействий, интегральные схемы, проектируемые и изготавливаемые в Киевском НИИ микроприборов, могут привлечь внимание и заинтересованность потребителей только при гарантиях высокого качества, своевременных поставок и существенно более низкой цены КМОП ИС в сравнении с зарубежными функциональными аналогами. В связи с этим был выполнен технико-экономический анализ факторов, ограничивающих применение ряда материалов в проектировании и производстве КМОП ИС ключей с управлением, коммутаторов и переключателей. Были рассмотрены такие материалы на основе монокристаллического крем-

ния, как ДИКЭД-структуры, эпитаксиальные структуры, структуры на основе кремния на изоляторе и кремния с однородным распределением электрофизических параметров по всему объему пластины (объемный кремний).

В данной работе представлены некоторые конструкторско-технологические параметры, ограничивающие возможности проектирования на объемном кремнии КМОП ИС для средств связи, сбора, обработки информации и автоматизированного управления исполнительными устройствами.

Аналоговые ключи с управлением, коммутаторы, переключатели (табл. 1), освоенные в производстве, спроектированы в НИИ микроприборов на основе объемного кремния КДБ10(100) с *n*-карманной изоляцией *p*-канальных от *n*-канальных низкотоковых ( $V_{th}=0,8\pm 0,2$  В) МОП-транзисторов. Отдельный аналоговый ключ, у которого входом является соединенные сток *n*-канального с истоком *p*-канального МОП-транзистора, а выходом – соединенные исток *n*-канального со стоком *p*-канального МОП-транзистора, управляется разнополярными напряже-

Таблица 1

Электрические характеристики КМОП ИС

Обозначение	Сопротивление ключа, не более, Ом	Напряжение питания, В			Коммутируемое напряжение, В	Коммутируемый ток, мА	Аналог	
		$U_{cc1}$	$U_{cc2}$	$U_{cc3}$				
Аналоговые ключи с управлением								
1834КН7 – 2-канальный	15,0	16,5; 52,0	-16,5; 0	—	15,0; 50,0	-15,0; 0	50,0	К590КН9
1834КН5 – 4-канальный	50,0	16,5	-16,5	5,5	15,0	-15,0	30,0	К590КН5
1834КН8В – 8-канальный	50,0	16,5; 52,0	-16,5; 0	—	15,0; 50,0	-15,0; 0	30,0	—
Коммутаторы								
1834КН3 – двоянный, 4-канальный	100,0	16,5	-16,5	—	15,0	-15,0	50,0	К590КН3
1834КН6 – 8-канальный	100,0	16,5	-16,5	—	15,0	-15,0	50,0	К590КН6
1834КН2 – двоянный, 8-канальный	100,0	16,5	-16,5	—	15,0	-15,0; 0	50,0	К591КН2
1834КН4 – 16-канальный	100,0	16,5; 52,0	-16,5; 0	—	15,0; 50,0	-15,0; 0	50,0	К591КН3
Переключатели								
1834КН10 – 4-канальный с попарным управлением	50,0	16,5	-16,5	—	15,0	15,0	20,0	К590КН4
1834КН11 – 4-канальный с общим управлением	50,0	16,5	-16,5	—	15,0	-15,0	20,0	К590КН7

ниями, которые подаются на затворы с выходных инверторов устройства управления ключом (УУК).

Для коммутации ключом напряжения положительной полярности на подложку *p*-канального МОП-транзистора необходимо подать положительное напряжение  $U_{cc1}$ , а для коммутации ключом напряжения отрицательной полярности необходимо на подложку *n*-канального МОП-транзистора подать отрицательное напряжение  $U_{cc2}$  не менее (по модулю) коммутируемого отрицательного напряжения  $U_{к2}$ . Эти напряжения на подложках исключают возникновение не управляемых напряжениями на затворах электрических токопроводящих цепей через *p-n*-переходы "сток-подложка", "исток-подложка" в ключевых КМОП-транзисторах аналогового ключа. Подача отрицательного напряжения на подложку отдельного *n*-канального МОП-транзистора невозможна, т. к. при *n*-карманной изоляции *p*-канальных МОП-транзисторов *n*-канальные МОП-транзисторы могут быть созданы только на одной общей подложке объемного кремния *p*-типа проводимости. Поэтому отрицательное напряжение подается как на подложки *n*-канальных транзисторов аналоговых ключей, так и на подложки всех *n*-канальных транзисторов, входящих в состав УУК, в том числе во входном инверторе УУК. Управление входным инвертором устройства управления ключом осуществляется напряжением логического нуля ( $0 \leq U_{вх} \leq 0,8$  В) и логической единицы ( $3,0 \text{ В} \leq U_{вх} \leq 5$  В) от ТТЛ интегральной схемы.

Во входном инверторе устройства управления ключом отрицательное напряжение на общей подложке *p*-типа проводимости объемного кремния КМОП ИС увеличивает пороговое напряжение  $V_{tn}$  *n*-канального МОПТ [1, с. 114] на величину

$$\Delta V_{tn} = \frac{t_{ox} \sqrt{2N_a q \epsilon_0 \epsilon_n} (\sqrt{2\Psi_F + U_{пnn}} - \sqrt{2|\Psi_F|})}{\epsilon_0 \epsilon_d}; \quad (1)$$

$$V_n = V_{tn} + \Delta V_{tn}, \quad (2)$$

где  $t_{ox}$  – толщина подзатворного диэлектрика;

$V_n$  – пороговое напряжения *n*-МОПТ с учетом влияния напряжения  $U_{пnn} = U_{cc2}$ ;

$U_{пnn}$  – отрицательное напряжение на подложке относительно истока *n*-канального МОПТ, равное  $U_{cc2}$  и максимальному (по модулю) отрицательному коммутируемому напряжению  $U_k$ ;

$V_{tn}$  – пороговое напряжение при  $U_{пnn} = 0$ .

Так, для коммутации ключом отрицательного напряжения  $U_k = -16,5$  В подают такое же напряжение  $U_{cc2}$  на общую подложку КМОП ИС и, при концентрации акцепторов в подложке объемного кремния, равной  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , это напряжение увеличивает пороговое напряжение (2) *n*-канального МОП-транзистора во входном инверторе устройства управления ключом от  $V_{tn} = 1,0$  В до  $V_n = 3,0$  В. И тогда во входном инверторе для переключения *n*-МОПТ из закрытого в открытое состояние на его затвор необходимо подать напряжение логической единицы не менее 5 В. Для КМОП ИС, представленных в табл. 1,

управляющее напряжение 5 В подают на затвор *n*-МОПТ путем подключения резистора между выводом питания ТТЛ ИС и ее выходом. Такое подключение резистора рекомендуется и для КМОП ИС при отрицательных напряжениях питания  $U_{cc2}$  в диапазоне от минус 16,5 В до минус 5 В и напряжениях коммутации (по модулю) менее 16,5 В.

На рис. 1 представлены предельные значения коммутируемых напряжений ключом на нагрузку 1000 Ом в зависимости от величины отрицательного напряжения питания  $U_{cc2}$  КМОП ИС УР1834КН7, УР1834КН8 и УР1834КН4В. Заштрихованная область между линиями 1 и 2 представляет возможный диапазон коммутируемых напряжений при условии  $U_{к1} \leq U_{cc1}$  и  $|U_{к2}| \leq |U_{cc2}|$ . Ключи с управлением, коммутаторы, переключатели коммутируют также напряжения в пределах  $|-U_{cc2}| \leq U_k \leq U_{cc1}$  и в диапазоне низких напряжений питания вплоть до  $U_{cc1} \geq 4$  В,  $-16,5 \text{ В} \leq U_{cc2} \leq 0$  В.

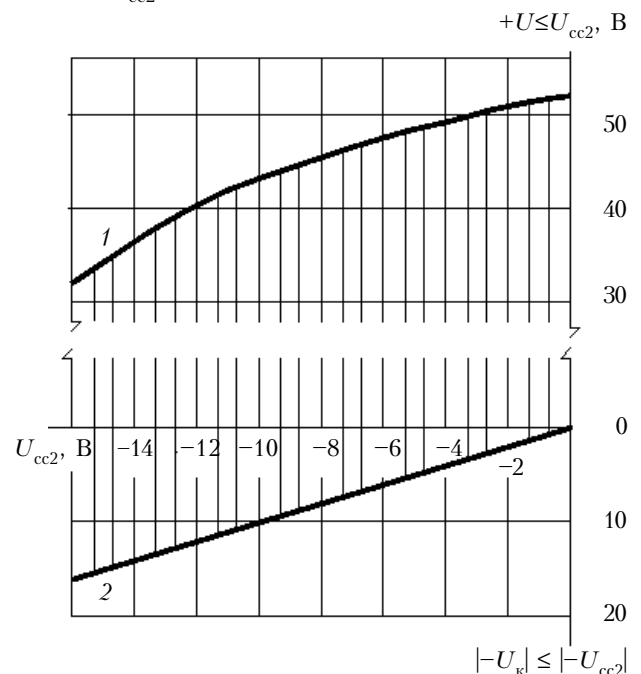


Рис. 1. Зависимость максимально возможного положительного коммутируемого напряжения ( $U_k \leq U_{cc1}$ ) от величины отрицательного напряжения питания  $U_{cc2}$  КМОП ИС (отрицательное напряжение коммутации  $U_k = U_{cc2}$ ):  
1 –  $U_{к1} = U_{cc1}$ ; 2 –  $U_{к2} = -U_{cc2}$

Как видно из рис. 1, конструкция КМОП ИС на основе *n*-карманной изоляции *p*-канальных комплементарных МОП-транзисторов при условии  $U_{cc1} \geq U_k$ ,  $U_{cc2} = 0$  обеспечивает коммутацию положительного однополярного напряжения  $U_k$  до 50 В, а также [2] обладает более высокой устойчивостью к возникновению тиристорного эффекта и радиационному воздействию  $\alpha$ -частиц в сравнении с *p*-карманной изоляцией *n*-канальных комплементарных транзисторов. Однако *n*-карманная изоляция комплементарных *p*-МОП-транзисторов не обеспечивает управление входного инвертора уровнем напряжения логической единицы от ТТЛ ИС при коммутации ключом двухполярного напряжения в диапазоне более чем

$\pm 20$  В из-за увеличения порогового напряжения  $V_{tn}$  в  $n$ -МОП-транзисторах до уровня выше предельно допустимого.

Вопросы проектирования высоковольтных КМОП ИС коммутаторов, ключей с управлением, переключателей, преобразователей уровней напряжений в диапазоне не более  $\pm 50$  В требуют нахождения компромиссных конструкторско-технологических решений по обеспечению:

- пробивных напряжений выше 100 В  $p$ - $n$ -переходов "сток – подложка", "исток – подложка" и предотвращения смыкания сток-истоковых  $p$ - $n$ -переходов при минимально допустимом расстоянии  $l$  между ними для получения низкого, менее 100 Ом, сопротивления открытого ключа на основе комплементарных МОП-транзисторов;

- оптимального соотношения размеров  $W_n, L_n$  и  $W_p, L_p$  – соответственно, ширины и длины каналов  $n$ - и  $p$ -канальных МОП-транзисторов во входном инверторе устройства управления ключом, зависящего от величины положительного напряжения питания КМОП ИС;

- высоких, более 100 В, пробивных напряжений подзатворного диэлектрика с одновременным получением низких пороговых напряжений  $n$ - и  $p$ -канальных МОП-транзисторов в пределах  $(0,8 \pm 0,2)$  В для эффективного управления входным инвертором устройства управления ключом уровнями напряжений логической единицы и нуля от ТТЛ ИС.

Проектирование высоковольтных аналоговых ключей для коммутации предельных напряжений  $\pm 50$  В проводится, с учетом обеспечения пробивных напряжений  $p$ - $n$ -переходов  $p$ -канальных МОПТ выше 100 В, на основе выбора подложки объемного кремния  $n$ -типа проводимости с максимально допустимой концентрацией доноров  $10^{15}$  см $^{-3}$ , что соответствует кремнию марки КЭФ 4,5 (100). Такого же порядка предельно допустимую результирующую концентрацию акцепторных и донорных примесей, с учетом перекompенсации примесной проводимости, технологически обеспечивают на поверхности  $p$ -кармана и  $n$ -областей стока, истока  $n$ -канальных МОП-транзисторов.

Пробивные напряжения  $p$ - $n$ -переходов также зависят от радиуса кривизны  $p$ - $n$ -перехода [3, с. 61–66], максимальной разницы потенциалов между затвором и стоком в закрытом состоянии КМОП-транзисторов ключа [4, с. 72] и расстояния от контакта к области стока до подзатворного диэлектрика.

Разность потенциалов между затвором и стоком в закрытом состоянии ключа на основе КМОПТ приводит к инверсии проводимости области стока, находящейся под затвором. Инверсионный слой ограничивает расширение  $p$ - $n$ -перехода "сток-подложка" в сторону истока. Обедненный слой  $p$ - $n$ -перехода формируется на поверхности области стока между контактом стоковой области и границей диэлектрика, находящегося под поликремниевым затвором. Лавинный пробой  $p$ - $n$ -перехода "сток-подложка" возникает в случае превышения предельно допустимой напряженности электрического поля в  $p$ - $n$ -переходе на поверхности стоковой области.

На основании эмпирической зависимости между величиной напряжения лавинного пробоя резкого  $p$ - $n$ -перехода и концентрацией примеси  $N$ , а также предельно допустимой напряженностью электрического поля в  $p$ - $n$ -переходе  $E(N)$  [3, с. 51–60], минимально допустимое расстояние  $l$  от контакта к области стока до подзатворного диэлектрика, находящегося под поликремниевым или алюминиевым затвором, определяют из соотношений

$$l \geq \frac{258 \cdot (10^{15})^{0,75}}{N^{0,75} E(N)} \text{ для } 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} < N < 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}; \quad (3)$$

$$l \geq \frac{53,6 \cdot (10^{16})^{0,56}}{N^{0,56} E(N)} \text{ для } 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} < N < 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (4)$$

Увеличение расстояния  $l$  более 3 микрон нецелесообразно из-за существенного вклада линейного сопротивления области стока  $R_c$  в общее сопротивление открытого ключа.

Размеры  $W_n, L_n$  и  $W_p, L_p$  комплементарных транзисторов входного инвертора УУК рассчитывают на основании заданных уровней входных напряжений логической единицы и нуля, подаваемых с выхода ТТЛ ИС, напряжения питания  $U_{cc1}$ , а также необходимых на выходе входного инвертора напряжений логической единицы  $U_{cc1} - V_{tp} \leq U_{вых(1)} \leq U_{cc1}$  и логического нуля  $0 \leq U_{вых(0)} \leq V_{tn}$ . На рис. 2 представлены зависимости минимально допустимых значений отношения удельной крутизны  $\beta_n$  к  $\beta_p$  для  $n$ - и  $p$ -канальных МОП-транзисторов входного инвертора от величины напряжения питания  $U_{cc1}$  при различных постоянных значениях входного напряжения логической единицы  $U_{вых(1)}$ , выходного напряжения логического нуля  $U_{вых(0)} \leq 0,6$  В и пороговых напряжений  $V_{tn} = V_{tp}$ .

Используя модель МОПТ в области насыщения выходных ВАХ при заданных токе потребления,  $U_{cc1}, V_{tp}, t_{ох}, \mu_{p0}$  и необходимом значении времени переключения из состояния логического нуля в состояние логической единицы входного инвертора, определяют отношение  $a = W_p/L_p$  для  $p$ -канального МОПТ. (Здесь  $\mu$  – подвижность носителей зарядов в канале.) На основании конструктивно-технологических ограничений при  $a < 1$  выбирают минимальный размер  $W_p$ , определяют  $L_p$ .

Исходя из заданных величин  $V_{tp} = V_{tn}, U_{вых(1)}$ , по графической зависимости на рис. 2 определяют минимально допустимое значение  $\beta_n/\beta_p$  и из соотношения

$$\frac{\beta_n}{\beta_p} = \frac{W_n L_p \mu_{n0} [1 + \theta(U_{cc1} - U_{вых1} - V_{Ttp})]}{W_p L_n \mu_{p0} [1 + \theta(U_{вых1} - V_{Tn})]} \quad (5)$$

определяют  $W_n/L_n$ , выбирают  $L_n$  и определяют  $W_n$  для  $n$ -канального МОПТ входного инвертора. (Здесь  $\theta$  – коэффициент, учитывающий снижение подвижности заряда в канале при увеличении напряжения на затворе.)

Информативные параметры модели МОП-транзистора (такие как  $\beta, \mu, \theta$ , пороговые напряжения и сопротивления области стока  $R_c$  истока  $R_n$  и кана-

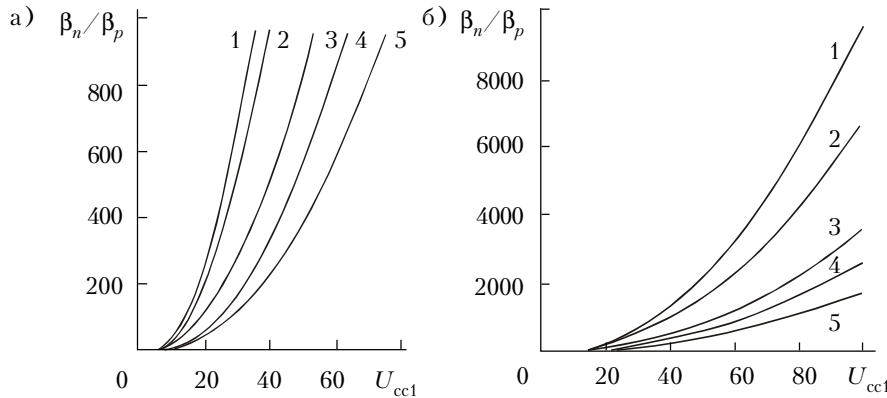


Рис. 2. Зависимость минимально допустимого отношения  $\beta_n/\beta_p$  в МОП-транзисторах входного инвертора от напряжения питания  $U_{cc1}$  для низковольтных (а) и высоковольтных (б) КМОП ИС ( $U_{\text{вых}(0)} \leq 0,6 \text{ В}$ ;  $V_{tn} = V_{tp}$ ):  
 1 -  $V_T = 2,2 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вх}(1)} = 3,0 \text{ В}$ ;  
 2 -  $V_T = 0,8 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вх}(1)} = 2,0 \text{ В}$ ;  
 3 -  $V_T = 0,8 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вх}(1)} = 3,0 \text{ В}$ ;  
 4 -  $V_T = 2,2 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вх}(1)} = 5,0 \text{ В}$ ;  
 5 -  $V_T = 0,8 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вх}(1)} = 5,0 \text{ В}$

ла  $R_k$ , а также параметры модели  $p-n$ -переходов) определялись на тестовых элементах с помощью аналитических зависимостей и методов, представленных в работах [5, 6].

Пробивное напряжение подзатворного диэлектрика  $U_{зп}$  определяется его толщиной  $t_{ox}$ , которая зависит от технологических режимов его создания. Для напряжения между затвором и подложкой  $U_{зп} = 100 \text{ В}$  требуемая толщина составляет  $t_{ox} = 1200 \dots 1500 \text{ \AA}$ .

Низкий уровень порогового напряжения  $V_{tn}$  ( $0,8 \pm 0,2 \text{ В}$ ) в  $n$ -канальных МОП-транзисторах достигается путем их изоляции от общей подложки объемного кремния  $n$ -типа проводимости и  $p$ -канальных МОПТ обратносмещенными  $p-n$ -переходами ( $p$ -карманы), выбором кристаллографической ориентации плоскости (100) объемного кремния на границе раздела "диэлектрик-полупроводник", а также дозами ионного легирования бором областей каналов комплементарных МОП-транзисторов  $0,01 \dots 0,03 \text{ мккулон}$ . В  $p$ -карманах истоки  $n$ -МОПТ электрически соединяются с их подложками ( $U_{\text{ппп}} = 0$ ).

На общей подложке объемного кремния  $n$ -типа проводимости создают  $p$ -канальные МОП-транзисторы. Их пороговое напряжение  $U_{tp} = 0,8 \pm 0,2 \text{ В}$  обеспечивают ионным легированием бором областей каналов в  $n$ -подложке объемного кремния и соединением области истока с общей подложкой  $n$ -типа проводимости, при этом  $U_{\text{ппп}} = 0$ .

Низкий уровень (менее  $100 \text{ Ом}$ ) сопротивления открытого ключа  $R_k$ , предотвращение смыкания областей стока с истоком при коммутации напряжений  $\pm 50 \text{ В}$ , минимальное влияние положительного и отрицательного напряжений на подложке соответственно  $p$ - и  $n$ -канальных МОП-транзисторов ключа обеспечивается, исходя из выражений для  $R_k$  и  $V_T$  [7], максимально допустимой концентрацией доноров в подложке объемного кремния  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , поверхностной концентрацией акцепторов в  $p$ -кармане не более  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , созданием плавных  $p-n$ -переходов с градиентом концентрации не более  $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ , выбором кристаллографической плоскости (100) на границе раздела "подзатворный диэлектрик - полупроводник", поликремниевыми затворами, легированными фосфором, минимально возможной толщиной подзатворного диэлектрика  $1200 \text{ \AA}$  на основе двуокиси кремния с  $\epsilon_d = 3,9$ , минимально допустимым расстоянием от подзатворного диэлектрика до кон-

тактов к стоковой, истоковой области, определяемого из выражений (3), (4), а также соотношения  $W/L$  в комплементарных МОП-транзисторах ключа с минимально допустимыми значениями  $L = 6 \text{ мкм}$ .

Кроме того, в проектируемых КМОП ИС путем выбора конструкции ключа на основе двух последовательно соединенных с общими истоками  $n$ -канальных МОП-транзисторов и создания новой схемы управления таким ключом обеспечивается коммутация двухполярных ( $\pm 50 \text{ В}$ ) напряжений при использовании только одного положительного источника напряжения питания КМОП ИС (см. табл. 2).

Создание КМОП ИС ключей с управлением, коммутаторов с коммутируемым напряжением более  $\pm 50 \text{ В}$  на объемном кремнии возможно при концентрации доноров в подложке менее  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , но это приведет к значительному росту сопротивления ключа из-за необходимого увеличения длины канала МОПТ для исключения смыкания  $p-n$ -переходов "сток-исток". А увеличение ширины канала  $W$  для снижения сопротивления ключа в открытом состоянии приводит к увеличению площади, занимаемой КМОП ИС, и экономической неэффективности их производства. Поэтому проектирование КМОП ИС для коммутации напряжений в диапазоне более  $\pm 50 \text{ В}$  при обеспечении сопротивления ключа порядка единиц или десятков Ом необходимо проводить на основе применения ДИКЭД-структур с формированием ДКМОП-транзисторов.

\*\*\*

Таким образом, проектирование высоковольтных КМОП БИС ключей и коммутаторов на основе изоляции  $p$ -канальных МОП-транзисторов от подложки кремния  $p$ -типа проводимости  $p-n$ -переходами, с обеспечением управления входным инвертором устройства управления ключом управляющим напряжением от ТТЛ ИС ограничивается максимально допустимым отрицательным напряжением питания и коммутации  $U_{cc2} \leq |-20| \text{ В}$ , т. к. это напряжение, подаваемое на общую подложку всех  $n$ -МОП-транзисторов с индуцированными каналами, увеличивает пороговое напряжение и  $n$ -канального МОП-транзистора во входном инверторе — до уровня, при котором положительное управляющее напряжение от ТТЛ ИС уже не в состоянии открыть его и переключать входной инвертор из состояния логической единицы в состояние логического нуля.

Электрические характеристики проектируемых КМОП ИС

Обозначение	Сопротивление ключа, не более, Ом	Напряжение питания, В		Коммутируемое напряжение, В		Коммутируемый ток, мА	Аналог
		$U_{cc1}$	$U_{cc2}$				
5701КН04 — 4-канальный ключ	50	4,5...55,0	—	50	-50	50	АДГ441
5701КН16 — 16-канальный коммутатор	100	4,5...55,0	-27,5...0	25	-25	30	АДГ506А

Проектирование высоковольтных КМОП ИС ключей и коммутаторов на основе подложек объемного кремния  $n$ -типа проводимости и изоляции  $p$ -карманных МОП-транзисторов от подложки  $p-n$ -переходами позволяет увеличить коммутируемые отрицательные напряжения до  $|-50|$  В, благодаря возможности исключения влияния отрицательного напряжения  $U_{cc2} \leq |-50|$  В на пороговое напряжение  $n$ -канального МОП-транзистора во входном инверторе путем электрического соединения его истока с подложкой в  $p$ -кармане. Ограничивающими факторами проектирования ключей, коммутаторов, переключателей для коммутации положительных и отрицательных напряжений в диапазоне более  $\pm 50$  В являются пробивные напряжения  $p-n$ -переходов и экономическая нецелесообразность увеличения пробивных напряжений путем снижения концентрации примесей в подложке объемного кремния  $n$ -типа проводимости, т. к. это, в итоге, для обеспечения сопротивления открытого ключа менее 100 Ом приводит к существенному увеличению площади, занимаемой КМОП ИС на пластине кремния.

В КНИИ МП проектирование ключей с управлением, коммутаторов, переключателей для коммутации напряжений более  $\pm 50$  В осуществляется

на основе ДКМОП-транзисторов с применением ДИКЭД-структур.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Интегральные схемы на МДП-приборах. — М.: Мир, 1975.
2. Shimohigashi K. and other. An  $n$ -well CVOS dynamic RAM // IEE Trans. — 1982. — Vol. SC-17, N 2. — P. 344–348.
3. Грехов И. В., Сержкин Ю. Н. Лавинный пробой  $p-n$  перехода в полупроводниках. — Л.: Энергия, 1980.
4. Ричман П. Физические основы полевых транзисторов с изолированным затвором. — М.: Сов. радио, 1971.
5. Zolotarevsky V. I., Serdyuk G. B., Samotovka L. I. et al. SOI-based Ics design, technology and electrical diagnostics // Physical and technical problem of SOI structures and devices. — Gurzuf, Ukraine. — November 1–4, 1994. — P. 69–70.
6. Lysenko V. S., Zolotarevsky V. I., Samotovka L. I. et al.  $P-n$  junction informative parameters and yield of SOI CMOSICs // Perspectives, science and technologies for novel silicon on insulator Devices. — Kyiv, Ukraine. — October 12–15, 1998. — P. 25.
7. // Зарубежная электронная техника. — М.: ЦНИИ “Электроника”, 1976. — Вып. 21. — С. 10–11.