

Д. ф.-м. н. А. Н. ГОРБАНЬ, к. т. н. В. В. КРАВЧИНА

Украина, Запорожский классический приватный университет;  
Запорожская государственная инженерная академия  
E-mail: kravchina@list.ru

Дата поступления в редакцию  
31.01 2011 г.

Оппонент к. т. н. Л. И. САМОТОВКА  
(НИИ микроприборов НАНУ, г. Киев)

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ИС

*Технология формирования ИС с полной диэлектрической изоляцией, объединяющая разные технологии, позволила получить значения токов утечки ИС на уровне единиц микроампера при прямом импульсном токе в 0,5 А.*

При разработке радиационно стойких ИМС с малыми токами утечки обычно применяют кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией (КСДИ). Такие структуры получают с помощью технологий формирования диэлектрических пленок оксида кремния и толстых пленок поликристаллического кремния ( $\text{Si}^*$ ) или технологий срачивания пластин с помощью диэлектрических пленок с последующим использованием процессов полирования и получения областей («карманов») монокристаллического кремния, изолированных диэлектрическими пленками (например, пленками оксида кремния  $\text{SiO}_2$ ). Подобные технологии формирования КСДИ имеют ограничение по минимальной толщине областей монокристаллического кремния (2—3 мкм). Необходимость получения малых токов утечки ИМС ( $I_0=10\text{—}100$  мкА), высокой частоты обмена сигналов информации, высоких коэффициентов усиления ( $\beta=40\text{—}70$ ) сигналов разной полярности и больших импульсных токов коллектора ( $I_k=0,5$  А) биполярных транзисторов в активном режиме делает невозможным использование горизонтальных транзисторов. Это обуславливает необходимость разработки конструкции и технологии формирования комплементарных вертикальных транзисторов, которые могут обеспечить указанные характеристики.

При изготовлении таких транзисторных структур в технологии КСДИ для формирования областей монокристаллического кремния противоположного типа проводимости можно использовать процессы перекompенсации примеси подложки с помощью дополнительных процессов диффузии легирующей примеси. Но по технологии КСДИ достаточно сложно получать транзисторные структуры в слоях кремния толщиной 2—4 мкм.

Целью настоящей работы была разработка конструкции вертикальных комплементарных транзисторов с полной диэлектрической изоляцией, разработка новых технологических процессов создания на их основе радиационно стойких ИС с параметрами, которые обеспечивают низкие значения тока утечки наря-

ду со значительными величинами прямого тока и пробивного напряжения при частоте обмена сигналов информации на уровне 500 кГц.

Возможность технологического формирования и использования слоев кремния толщиной 2—4 мкм с точно определенными параметрами в отсутствие многократной перекompенсации примесей была достигнута за счет объединения технологии изготовления КСДИ с технологией «Изопланар». При этом за счет внедрения процессов эпитаксии появляется возможность формирования на пластинах КСДИ слоев монокристаллического кремния необходимой толщины, что позволяет создавать комплементарные вертикальные транзисторные структуры с нужными частотными и вольт-амперными характеристиками.

Технология изготовления структур с вертикальными комплементарными транзисторами была опробована при изготовлении ИС 1567АП1 и 1567АП2. ИС 1567АП1 представляет собой двухканальный дифференциальный приемник сигналов в коде RZ по ОСТ (ARNIC-429) с мультиплексором каналов на общие выходные формирователи сигналов информации и строба с частотой 250 кГц. ИС 1567АП2 является передатчиком сигналов в коде RZ по ОСТ (ARNIC-429) на частоте 250 кГц на линию из витой пары. Назначение предложенной системы передачи сигналов состоит в реализации физического уровня между приборного интерфейса измерительных, контролируемых и управляемых комплексов, например навигационных комплексов. Система обеспечивает обмен цифровой информацией в широком диапазоне скорости передачи, при этом на приемном конце восстанавливаются импульсы синхронизации.

Для формирования симметричных положительных и отрицательных импульсов радиационно стойких ИМС в соответствии с ОСТ были разработаны электрические схемы на основе комплементарных транзисторов, через один из которых в прямом направлении питания протекает импульсный ток величиной 0,5 А, а ток утечки ИМС в таких схемах при температуре 125°C меньше 100 мкА.

При разработке ИМС проводилось исследование процессов локальной эпитаксии монокристаллического кремния с формированием локальной изоляции, которая совмещалась с диэлектрической изоляцией структур КСДИ, чем обеспечивалось формирование полной диэлектрической изоляции структур эле-

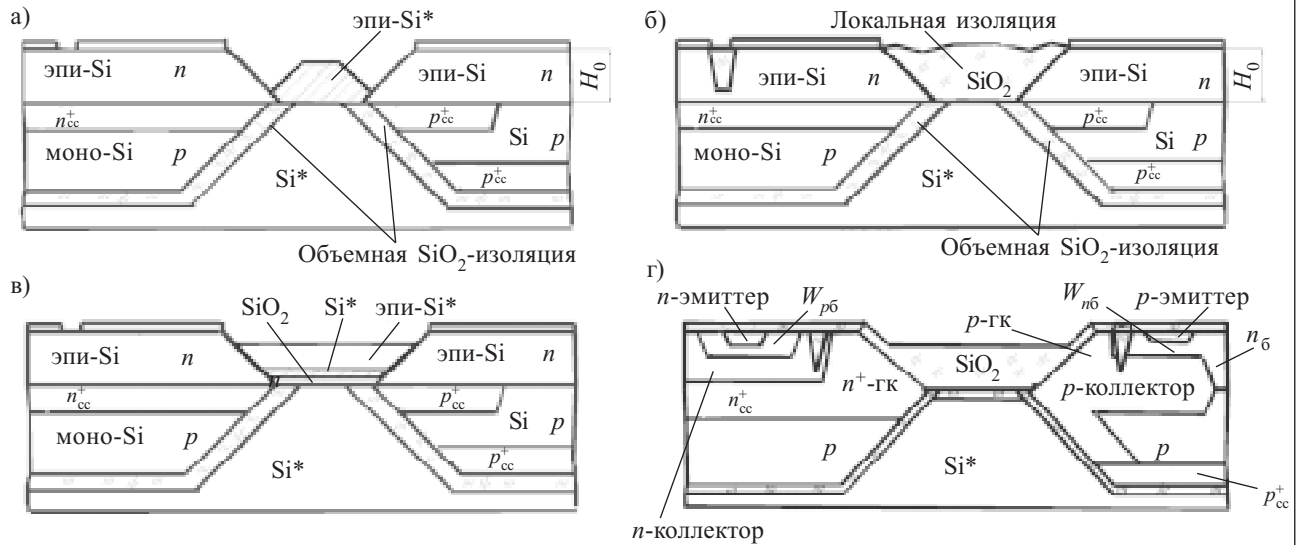


Рис. 1. Схемы структур ИМС:

*а* — формирование пленок эпитаксиального кремния  $\text{эпи-Si}^*$  с  $W$ -подобным рельефом; *б* — сращивание областей объемной  $\text{SiO}_2$ -изоляции структур КСДИ или выращиваемых пластин с локальной боковой  $\text{SiO}_2$ -изоляцией в области эпитаксиальных пленок; *в* — формирование пленок эпитаксиального кремния  $\text{эпи-Si}^*$  с дополнительными пленками  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}^*$ ; *г* — структура комплементарных вертикальных транзисторов ( $n_{cc}^+$ ,  $p_{cc}^+$  — скрытые слои легирующих примесей;  $n^+$ -гк,  $p$ -гк — глубокие коллекторы;  $W_{pб}$ ,  $W_{nб}$  — толщина базы соответственно  $n$ - $p$ - $n$ - и  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторов)

ментов ИМС. Первоначально эпитаксия монокристаллического кремния проводилась на подложки из поликристаллического кремния ( $\text{Si}^*$ ), которые содержат области монокристаллического кремния ( $\text{Si}$ )  $p$ -типа проводимости (карманы). Процессы эпитаксии проводились из газовой фазы тетрахлорида кремния на установке УНЕС-2Г. При этом формировалась эпитаксиальная пленка монокристаллического кремния  $n$ -типа проводимости, легированная примесями фосфора, с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Эволюция рельефа поверхности изучалась при помощи растровой электронной микроскопии [1—4]. На рис. 1 показаны схемы структур ИМС после эпитаксии и формирования локальной боковой изоляции, которая контактирует с объемной изоляцией КСДИ.

В областях над карманами из монокристаллического кремния  $\text{Si}$  (100) формируется эпитаксиальный монокристаллический кремний (эпи-Si). Над областями из поликремния  $\text{Si}^*$  и  $\text{SiO}_2$ -изоляции первого уровня осаждаются эпитаксиальный поликристаллический кремний (эпи-Si\*). При температуре эпитаксии 1050°C толщина слоя эпи-Si\* составляет от 1/2 до 2/3 значения толщины слоя эпи-Si  $H_0$  (рис. 1, а). Уменьшение толщины области  $\text{Si}^*$  наблюдается на границе с монокристаллическим кремнием и в областях с большой плотностью монокристаллического эпи-Si, что объясняется концентрационными отличиями газовых потоков вследствие преобладающей скорости роста эпи-Si в направлении [100]. Толщина слоя эпитаксиального кремния над областями оксида кремния (объемной изоляции подложки КСДИ) составляет около 1/3  $H_0$ .

Кинетика процессов осаждения кремния в области оксида кремния отмечается селективностью скорости осаждения в зависимости от температуры. При снижении температуры до 800—900°C и уменьшении расхода хлора скорость осаждения эпи-Si\* увеличивается. Исследование процессов эпитаксии на поверхности  $\text{SiO}_2$  большой площади показало, что

образование и увеличение зародышей новой фазы  $\text{Si}^*$  происходит в отдельных локальных областях, что приводит к осаждению и росту новой фазы в виде отдельных шариков или их половинок с радиусом 1,5—5,5 мкм. Если повысить температуру до 1050°C, то роста эпи-Si\* над областями из оксида кремния не происходит. Подобная зависимость наблюдается и при более низкой температуре при повышении расхода хлора. При температуре 1050°C скорость травления хлором образующихся на поверхности  $\text{SiO}_2$  зародышей фазы  $\text{Si}^*$  превышает скорость их формирования. При температуре 800°C скорость травления уменьшается, и образование частичек фазы  $\text{Si}^*$  происходит более интенсивно, что в дальнейшем обеспечивает формирование комфотерных структур. Такие структуры имеют плавный рельеф, что создает приемлемые условия для формирования пленок металлизации и применения планарной технологии в целом. Однако при температуре 800°C формируется недопустимо большое количество дефектов в пленке эпитаксиального  $\text{Si}$  (100). Скорость роста эпитаксиальных пленок  $\text{Si}$  (100) почти на порядок выше скорости роста эпитаксиальных пленок  $\text{Si}$  (111) на боковых поверхностях выступов монокристаллического  $\text{Si}$  (100).

Рассмотрим особенности разработанной технологии изготовления ИМС. Внешний вид поверхности и скола кристалла ИС после эпитаксии при температуре 1050°C показан на рис. 2, где видно, что плоские поверхности карманов монокристаллического кремния разделены рельефными участками поликристаллического кремния. При температуре эпитаксии 1050°C формирование эпитаксиального кремния на поверхности объемной  $\text{SiO}_2$ -изоляции происходит за счет роста и увеличения объема соседних боковых поверхностей поликристаллического кремния с одной стороны и монокристаллического кремния — с противоположной стороны (рис. 1). Вследствие наличия двух областей  $\text{SiO}_2$ , разделенных  $\text{Si}^*$ , и кинетических отличий процесса роста пленок эпитакси-

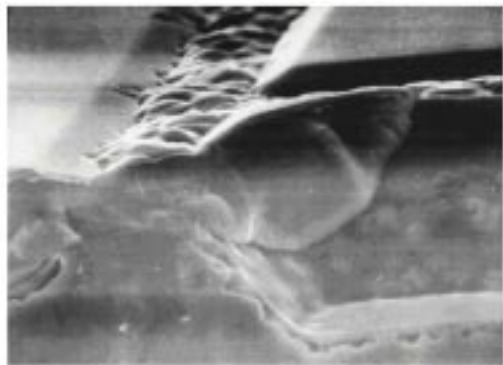


Рис. 2. Поверхность и скол кристалла ИМС после формирования эпитаксиальных пленок Si в области карманов из моно-Si и эпи-Si\* в области из поликристаллического кремния и слоя SiO<sub>2</sub> (толщиной 1 мкм) объемной изоляции структур КСДИ

ального поликристаллического кремния Si\* на разных материалах в области изоляции КСДИ-структур при эпитаксии формируется W-подобный рельеф поверхности [2, 3], впадины которого формируются над областями SiO<sub>2</sub> (рис. 1). Такой рельеф позволяет проводить процесс окисления и формирования локальной SiO<sub>2</sub>-изоляции с планарной поверхностью без предварительного дополнительного травления для формирования углублений, необходимых для получения полной изоляции.

Кроме того, W-подобный рельеф с наклонными боковыми поверхностями обеспечивает уменьшение механических напряжений (в отличие от канавок с вертикальными боковыми поверхностями в классической технологии «Изопланар») при термическом формировании толстых пленок локальной изоляции и исключает процессы генерации дефектов кристаллической решетки в эпитаксиальных слоях монокремния. Эпитаксиальные пленки также отличаются от монокремния подложек отсутствием дефектов, которым соответствуют глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне. Благодаря этому уменьшается обратный ток *p-n*-переходов и создаются условия для получения малых токов утечки ИМС. Технология формирования ИС с полной диэлектрической изоляцией, объединяющая разные технологии, позволила получить значения токов утечки ИС на уровне единиц микроампера при прямом импульсном токе в 0,5 А.

С целью расширения технологических и конструктивных возможностей создавались структуры с увеличенной толщиной эпитаксиального слоя (3—4 мкм). В этом случае применялась также и технология сращивания монокристаллических пластин с использованием технологий КНИ. По технологии эпи-КСДИ перед эпитаксией в области изоляции создавались дополнительные пленки оксида кремния и поликристаллического кремния, как это показано на рис. 1, в [4]. Защита поликристаллическим кремнием поверхности дополнительной пленки SiO<sub>2</sub> обеспечивала осаждение эпитаксиальных пленок только на области монокристаллического и поликристаллического кремния и делала поверхность структур более комфортной. Толщина слоя эпи-Si\* составляла 2,6—2,8 мкм, а поскольку максимальная толщина оксида кремния локальной изоляции обычно составляет 2,0—2,5 мкм,

необходимо было произвести травление эпи-Si\* для частичного удаления слоя (толщиной в 1,2—2,4 мкм). Остаточная толщина полученного слоя эпи-Si\* составляет 1,2—1,4 мкм. Таким образом, появляется дополнительная возможность корректирования планарности поверхности изоляции ИС [4] путем выбора необходимой толщины дополнительной пленки оксида кремния.

При вертикальной конструкции комплементарных транзисторов (рис. 1, з) необходимо сформировать глубокие коллекторы, диффузионные области которых для *p-n-p*-транзисторов формируют одновременной диффузией в объем эпитаксиальной пленки примеси из скрытого слоя ( $p_{cc}^+$ ) поверхности кремния подложки с одной стороны и из газовой фазы через поверхность эпитаксиального кремния — с другой стороны. Для уменьшения сопротивления и времени диффузии можно использовать открытые области боковых участков эпитаксиального монокристаллического кремния, которые расположены ближе к поверхности скрытых слоев [4]. Конструкция *p-n-p*-транзисторов предусматривает формирование базы в слое кремния эпитаксиальной пленки, а для формирования базы *n-p-n*-транзисторов используются более низкоомные области легированного бором кремния. В области более высокоомной базы *p-n-p*-транзисторов возникают объемные обедненные слои большей толщины и, соответственно, толщина базы *p-n-p*-транзисторов должна быть больше, чем толщина базы *n-p-n*-транзисторов. Следовательно, сначала происходит загонка примеси бора и начало отжига диффузионных областей эмиттеров *p-n-p*-транзисторов, а затем загонка примеси фосфора эмиттеров *n-p-n*-транзисторов. После этого проводят совместный финишный отжиг с окончательным формированием диффузионных областей обоих типов эмиттеров. При этом базовые области *p-n-p*-транзисторов формируют с помощью встречных процессов диффузии бора с эмиттерного и коллекторного слоев. Уровень последнего задает глубину перехода «база-коллектор» и первоначально формируется в процессе эпитаксии и при формировании слоя глубокого коллектора. Расположение этого уровня моделируется при последующих операциях формирования базы *n-p-n*-транзисторов, эмиттеров *p-n-p*- и *n-p-n*-транзисторов. Так, *n-p-n*-транзисторы имеют структуру дрейфового транзистора со встроенным ускоряющим электрическим полем в базовой области со ступенчатым коллекторным переходом. Для *p-n-p*-транзисторов характерна структура бездрейфового транзистора с более плавным коллекторным переходом. В *p-n-p*-транзисторе происходит моделирование обедненного объемного слоя: уменьшение толщины в области диффузионного коллектора и увеличение его толщины в области базы с относительно высокоомным слоем эпитаксиального кремния.

При формировании эпитаксиального слоя толщиной 2,2 мкм с удельным сопротивлением 0,85—1,05 Ом·см значение пробивного напряжения  $U_{кз}$  «коллектор—эмиттер» составило 14—17 В при коэффициенте усиления  $\beta=60$  для *n-p-n*-транзисторов и 22—24 В при  $\beta=30—35$  для *p-n-p*-транзисторов. После оптимизации конструкции и технологических режимов ВАХ транзисторов и параметры ИМС в целом улучшились. Так, при увеличении удельного сопротивления эпитак-

сиального слоя до 1,0—1,25 Ом·см и его толщины до 2,5 мкм для *n-p-n*-транзисторов получены значения  $U = 19\text{—}22$  В при  $\beta=60$ , а для *p-n-p*-транзисторов —  $U_{кз} = 28\text{—}30$  В при  $\beta=35\text{—}45$  при уменьшении толщины базы с 0,8 до 0,7 мкм. Обратное напряжение пробоя  $U_{б3}$  эмиттерного перехода составило  $U_{б3}=8$  В. Эта величина обеспечивается благодаря наличию обедненного слоя, перекрывающего *n*-базу *p-n-p*-транзистора, толщиной  $W_6$ , которую можно рассчитать по формуле [5]

$$W_6 = W_{\text{бопр}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{U_6}{U_{\text{бопр}}}} \right), \quad (1)$$

где  $W_{\text{бопр}}$  — толщина обедненного слоя при напряжении лавинного пробоя  $U_{\text{бопр}}=100$  В кремния базового слоя неограниченных размеров с концентрацией легирующей примеси фосфора  $N_d=5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

В соответствии с формулой (1), напряжение  $U_6=8$  В обеспечивается при толщине слоя кремния базы 0,7 мкм, а обедненному слою *p*-области коллекторного *p-n*-перехода с распределением легирующих примесей, близким к линейному, соответствует падение напряжения в 20—22 В, что в сумме определяло значение напряжения пробоя «коллектор—эмиттер» в 28—30 В.

Для исследуемых комплементарных транзисторов зависимость коэффициента передачи тока  $\beta_F$  в схеме с общим эмиттером в активном режиме работы транзистора от концентрации легирующих примесей эмиттера и базы, а также от толщины  $W_6$  *n*-базы *p-n-p*-транзистора можно записать как [5, 6]

$$\beta_F = \left[ \frac{1 \left( \frac{W_6}{L_p} \right)^2}{2} \frac{1}{\eta} + \frac{D_{n3} Q_{60}}{D_{p6} Q_{30}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $L_p$  — диффузная длина дырок в *n*-базе,  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ;  $\eta$  — коэффициент, величина которого зависит от наличия в базе встроенного электрического поля, для *p-n-p*-транзистора  $\eta=1$ , а для *n-p-n*-транзистора  $\eta=2\text{—}4$  и больше;

$D_p, \tau_p$  — соответственно коэффициент диффузии и время жизни дырок в *n*-базе;

$D_{n3}, D_{p6}$  — коэффициенты диффузии соответственно электронов в эмиттере и дырок в базе;

$Q_{60}$  и  $Q_{30}$  — плотности зарядов ионизирующих примесей в базе и эмиттере, соответственно.

Для *n-p-n*-транзистора формула (2) записывается аналогично.

Конструкция комплементарных транзисторов, которые сформированы в достаточно тонких пленках эпитаксиального кремния, позволяет получить приемлемые коэффициенты усиления при значительных пробивных напряжениях. Для их реализации эмиттерные слои транзисторов формировали так, чтобы получить значительный коэффициент инжекции, что и обеспечивало формирование относительно больших импульсных коллекторных токов. Такая величина коэффициентов инжекции обеспечивалась высоким уровнем легирования эмиттерных областей с концентрацией легирующей примеси около  $10^{21}$  см<sup>-3</sup> и технологическими условиями сохранения высокого уровня интегрального заряда ионизирующих примесей

эмиттеров до конечного этапа формирования ИМС. Зависимость коэффициента инжекции  $\gamma$  от концентрации легирующих примесей для *p-n-p*-транзистора можно записать как [6]

$$\gamma = \left( 1 + \frac{Q_6 D_{n3}}{Q_3 D_{p6}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $Q_6, Q_3$  — заряд ионизирующих примесей в *n*-базе и *p*-эмиттере, соответственно,  $Q_6 = N_{d6} W_6$ ,  $Q_3 = N_{a3} x_3$ ;  $N_{d6}, N_{a3}$  — концентрация легирующих примесей соответственно базовых и эмиттерных слоев;  $x_3$  — толщина эмиттерного слоя.

Для *n-p-n*-транзистора формула (3) записывается аналогичным образом.

Технология дальнейшего формирования ИС предусматривает сохранение высоких значений коэффициентов инжекции. При этом предполагается соблюдение определенных предосторожностей, например предотвращение растворения кремния в пленке алюминия в области контакта, что позволяет использовать сплавы алюминия с кремнием, и др. Применение известных решений, таких как формирование металлизации с контактами Шоттки или защита контактов пленками поликристаллического кремния Si\*, также помогают сохранить достаточно высокие значения коэффициентов инжекции. В свою очередь, формирование подобных контактов позволяет повысить быстродействие как отдельных транзисторов, так и схемы в целом.

Поскольку полученные значения предельной частоты транзисторов составляли не менее 150 МГц, а требуемая рабочая частота при применении микросхемы не превышает 1 МГц, обеспечивался достаточный запас по частоте, и частотная зависимость коэффициента усиления не нуждалась в дополнительном анализе.

\*\*\*

С помощью разработанной конструкции и технологии изготовления вертикальных комплементарных транзисторов получены ИС с полной диэлектрической изоляцией. При величине максимального коллекторного тока 0,5 А значения токов утечки функционирующих ИС составляют единицы микроампера.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Горбань А. Н., Кравчина В. В., Костенко В. В., Кравчина А. В. Дослідження процесів локального осадження плівок кремнію // Тр. IX Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2008». — Украина, г. Одесса. — 2008. — Т. 2. — С. 187.
2. А.с. 1261524 СССР. Способ изготовления кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / В. А. Липко, Н. В. Макаренко, А. П. Трещун и др. — 1990. — Бюл. № 15.
3. Патент на полезную модель 27068. Способ изготовления кремниевых структур с комбинированной диэлектрической изоляцией комплементарных транзисторов / В. О. Костенко, В. В. Кравчина, Д. М. Гомольский. — 2007. — Бюл. № 16.
4. Декларационный пат. 29594А Украины. Способ изготовления интегральных микросхем с комплементарными транзисторами / А. Н. Горбань, В. В. Кравчина, В. О. Костенко. — 2004. — Бюл. № 8.
5. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. — М.: Энергоиздат, 1981.
6. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. — М.: Мир, 1989.