

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 (Si^*) или технологий срачивания пластин с помощью диэлектрических пленок с последующим использованием процессов транзисторирования и получения областей («карманов») монокристаллического кремния, изолированных диэлектрическими пленками (например, пленками оксида кремния 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 сигналами 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 междуприборного 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-

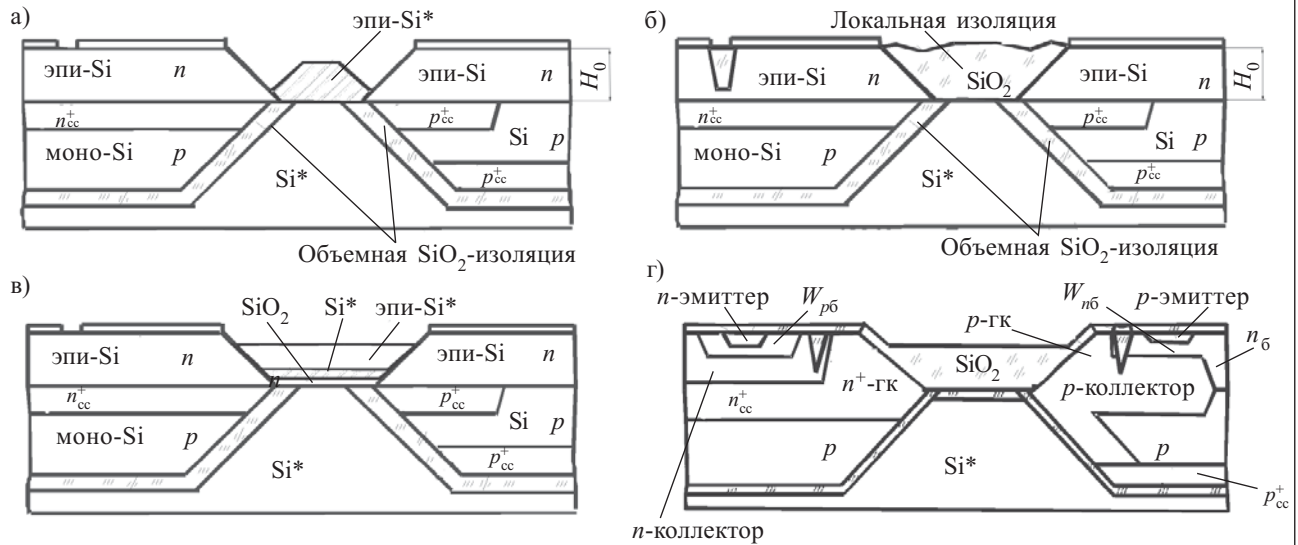


Рис. 1. Схемы структур ИМС:

а — формирование пленок эпитаксиального кремния с *W*-подобным рельефом; *б* — сращивание областей объемной SiO_2 -изоляции структур КСДИ или выращиваемых пластин с локальной боковой SiO_2 -изоляцией в области эпитаксиальных пленок; *в* — формирование пленок эпитаксиального кремния с дополнительными пленками SiO_2 и Si^* ; *г* — структура комплементарных вертикальных транзисторов (n^+ , p^+ — скрытые слои легирующих примесей; n^+ -гк, p -гк — глубокие коллекторы; W_{p6} , W_{n6} — толщина базы соответственно n - p - n - и p - n - p -транзисторов)

ментов ИМС. Первоначально эпитаксия монокристаллического кремния проводилась на подложки из поликристаллического кремния (Si^*), которые содержат области монокристаллического кремния (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 Si (100) формируется эпитаксиальный монокристаллический кремний (эпи- Si). Над областями из поликремния Si^* и 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 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 SiO_2 большой площади показало, что

образование и увеличение зародышей новой фазы 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 SiO_2 зародышей фазы Si^* превышает скорость их формирования. При температуре 800°C скорость травления уменьшается, и образование частичек фазы 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 Si (100). Скорость роста эпитаксиальных пленок Si (100) почти на порядок выше скорости роста эпитаксиальных пленок Si (111) на боковых поверхностях выступов монокристаллического 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 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 SiO_2 , разделенных Si^* , и кинетических отличий процесса роста пленок эпитакси-

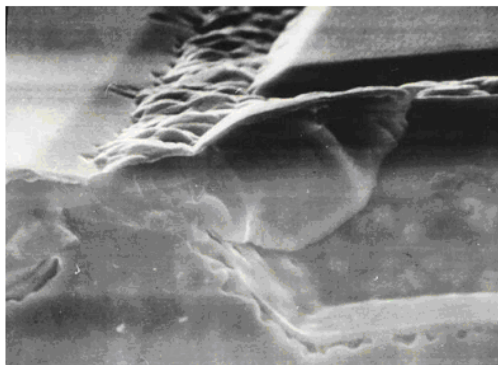


Рис. 2. Поверхность и скол кристалла ИМС после формирования эпитаксиальных пленок Si в области карманов из моно-Si и эпи-Si* в области из поликристаллического кремния и слоя SiO₂ (толщиной 1 мкм) объемной изоляции структур КСДИ

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 SiO₂ (рис. 1). Такой рельеф позволяет проводить процесс окисления и формирования локальной SiO₂-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 SiO₂ 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 $U_{\text{кз}} = 19\text{—}22$ В при $\beta=60$, а для $p-n-p$ -транзисторов — $U_{\text{кз}} = 28\text{—}30$ В при $\beta=35\text{—}45$ при уменьшении толщины базы с 0,8 до 0,7 мкм. Обратное напряжение пробоя $U_{\text{бз}}$ эмиттерного перехода составило $U_{\text{бз}}=8$ 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⁻³.

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 β_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]

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

где L_p — диффузная длина дырок в n -базе, $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$; η — 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, τ_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⁻³ и технологическими условиями сохранения высокого уровня интегрального заряда ионизирующих примесей

эмиттеров до конечного этапа формирования ИМС. Зависимость коэффициента инжекции γ 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. [Gorban' A. N., Kravchina V. V., Kostenko V. V., Kravchina A. V. // Tr. IX konf. «SIET-2008». Ukraine, Odessa. 2008. Vol. 2. P. 187]
2. А.с. 1261524 СССР. Способ изготовления кремниевых структур с диэлектрической изоляцией / В. А. Липко, Н. В. Макаренко, А. П. Трешун и др. — 1990. — Бюл. № 15. [А.с. 1261524 СССР. / V. A. Lipko, N. V. Makarenko, A. P. Treshchun i dr. 1990. Bull. N 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. [Patent na poleznuyu model' 27068 Ukraine. / V. O. Kostenko, V. V. Kravchina, D. M. Gomol'skii. 2007. Bull. N 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. [Deklaratsionnyi pat. 29594A Ukraine. / A. N. Gorban', V. V. Kravchina, V. O. Kostenko. 2004. Bull. N 8]
5. Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы. — М.: Энергоиздат, 1981. [Evseev Yu. A., Dermenzhi P. G. Moscow. Energoizdat. 1981]
6. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. — Moscow. Мир. 1989. [Maller R., Keimins T. M.: Mir, 1989]