

УДК 621.315.592

## Кремниевые структуры для силовой электроники

К. Л. ЕНИШЕРЛОВА, М. М. КРЫМКО

ГУП НПП “Пульсар”,  
Окружной проспект, 27, Москва 105187 (Россия)  
E-mail: pulsar@dol.ru

### Аннотация

Рассмотрены основные требования к свойствам высокоомных рабочих слоев многослойных структур, используемых при изготовлении полевых высоковольтных транзисторов, тиристоров и IGBT-приборов – наиболее распространенных типов мощных высоковольтных дискретных приборов. Экспериментально установлено, как может влиять неоднородность толщины и удельного сопротивления высокоомного рабочего слоя на параметры мощных МДП-транзисторов. Проанализирована целесообразность применения при производстве силовых приборов с  $U_{\text{проб}} > 800$  В двух- и трехслойных структур, формируемых методом прямого соединения кремниевых пластин с использованием для изготовления рабочего высокоомного слоя нейтронно-легированного кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки (FZ-Si). Продемонстрировано, что альтернативой FZ-Si может быть кремний, выращенный методом Чохральского в магнитных полях (CZM) с содержанием кислорода  $< 4-5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

При производстве практически всех основных типов мощных высоковольтных полупроводниковых приборов основным материалом на данном этапе продолжает оставаться кремний, и такое положение сохранится по крайней мере в первом десятилетии XXI века.

Активная часть мощных высоковольтных приборов ( $U_{\text{проб}} > 100$  В) формируется в основном на кремнии с удельным сопротивлением 20 Ом·см и выше, причем чем выше рабочее пробивное напряжение прибора, тем более высокоомный кремний должен использоваться. Для современных мощных дискретных высоковольтных приборов характерны, с одной стороны, рост размеров чипа в результате тенденции перехода от многокристального варианта к однокристалльному, с другой – уменьшение минимального топологического размера приборов, при этом основная масса мощных дискретных приборов и мощных интегральных схем (ИС) формируется планарно на кремниевой подложке. Что касается традиционных тиристоров, то у них основанием может являться вся кремниевая пластина.

Основными характеристиками мощных высоковольтных полупроводниковых прибор-

ов являются рабочее напряжение, ток и коммутируемая мощность, кроме того, у полевых и биполярных транзисторов и, следовательно, ИС на их основе – допускаемые паразитарные токи: для биполярных транзисторов – токи утечек  $I_{\text{ут}}$ , для полевых транзисторов – остаточные токи  $I_{\text{ост}}$ , определяющие идеальность обратной ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ) приборов. Для биполярных транзисторов, работающих на неосновных носителях заряда, превышение предельного значения тока утечек, связанное с наличием дефектов в базе прибора, приводящих к локализации тепловых полей и возникновению вторичного пробоя, очень часто является причиной более низкого выхода годных чипов, особенно для мощных транзисторов ВЧ- и СВЧ-диапазона с малой толщиной базы. При этом низкий выход годных биполярных транзисторов из-за утечек эмиттер-коллектора может быть связан как с трансформированными ростовыми дефектами материала, например дефектами эпитаксиальной пленки, так и с дефектами, приобретенными в процессе изготовления прибора, например дислокациями эмиттерного края.

Кроме того, в мощных биполярных транзисторах, работающих в режиме ключа, для увеличения быстродействия прибора необходимо обеспечение низкого времени жизни неосновных носителей заряда в области базы, что достигается, например, введением радиационных дефектов путем облучения прибора. Таким образом, для обеспечения требуемых параметров эффективности производства и надежности работы этого типа приборов необходима возможность управления структурными особенностями активных областей биполярных транзисторов.

Что касается дефектов, приводящих к ухудшению обратной ветви ВАХ (получение “мягких” характеристик), то нами, например, была получена прямая корреляция между плотностью мелких выделений (30–40 нм) в исходных эпитаксиальных пленках (предположительно выделения железа или кварца) и выходом годных чипов многоэмиттерного мощного биполярного транзистора ВЧ-диапазона на стадии контроля статического коэффициента усиления  $V_{ст}$  и токов утечек  $I_{кб}$  (рис. 1).

В полевых транзисторах, поскольку этот тип приборов работает на основных носителях заряда, к большим остаточным токам могут приводить лишь сравнительно крупные структурные нарушения, лежащие на границе или вблизи  $n$ - $p$ -перехода области стока. В частности, проведенный нами анализ

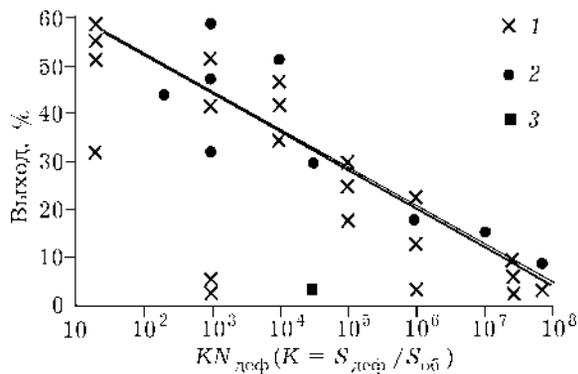


Рис. 1. Зависимость выхода годных чипов биполярных транзисторов на одной структуре-подложке от плотности дефектов исходных эпитаксиальных структур на стадии контроля  $V_{ст}$  и  $I_{кб}$  (годные  $V_{ст} > 10$ ,  $I_{кб} < 10$  мА): 1 – структуры из одного технологического процесса изготовления приборов; 2 – структуры из разных технологических процессов; 3 – партия с высокой плотностью дислокаций в центральной части структур ( $N_{дис} > 1 \cdot 10^4$  см<sup>-2</sup>).

показал отсутствие корреляции между плотностью наблюдаемых видов структурных дефектов в рабочих областях прибора (для мощных переключательных ДМОП- и ВМОП-транзисторов наиболее распространенным типом дефектов являются ОДУ и крупные (9–12 мкм) дислокационные петли) и остаточным током, и лишь при превышении  $N_{деф} > 10^4$  см<sup>-2</sup> наблюдалось ухудшение ВАХ диода стока. Высокая концентрация углерода и наличие крупных преципитатов кислорода в материале могут также приводить к возникновению большого остаточного тока у приборов такого типа.

При снижении степени непосредственного негативного влияния структурных дефектов на параметры приборов для мощных полевых транзисторов, IGBT-приборов, тиристоров очень критичной является однородность распределения легирующей примеси в рабочем слое, поскольку одной из основных характеристик, например, мощных МДП-транзисторов является остаточное сопротивление проводящей высокоомной области ( $R_{пров}$ ), определяющее непосредственно пробивное напряжение транзистора ( $U_{с-н(макс)}$ ) и, следовательно, количество рассеиваемой мощности. Это сопротивление ответственно также за максимальное значение частоты переключения, причем для обеспечения рабочего тока прибора  $I_{с(макс)}$  (ток стока максимальный) необходимо не только соответствие удельного сопротивления высокоомного слоя расчетному значению, но и минимальный разброс удельного сопротивления этого слоя как по пластине, так и по толщине слоя (рис. 2).

Кроме того, основным конструктивным параметром данных транзисторов является, как известно, суммарная протяженность канала [1], которую желательно уменьшить для уменьшения массы и габарита приборов. При расчете суммарной протяженности канала необходимо учитывать реально существующие разбросы значений удельного сопротивления и толщины высокоомного слоя как в пределах одной подложки, так и от подложки к подложке в партии. Поэтому сокращение разброса этих двух параметров рабочих высокоомных слоев позволяет более точно провести конструктивные расчеты и повысить выход годных транзисторов за счет уменьшения количества кристаллов с более низки-

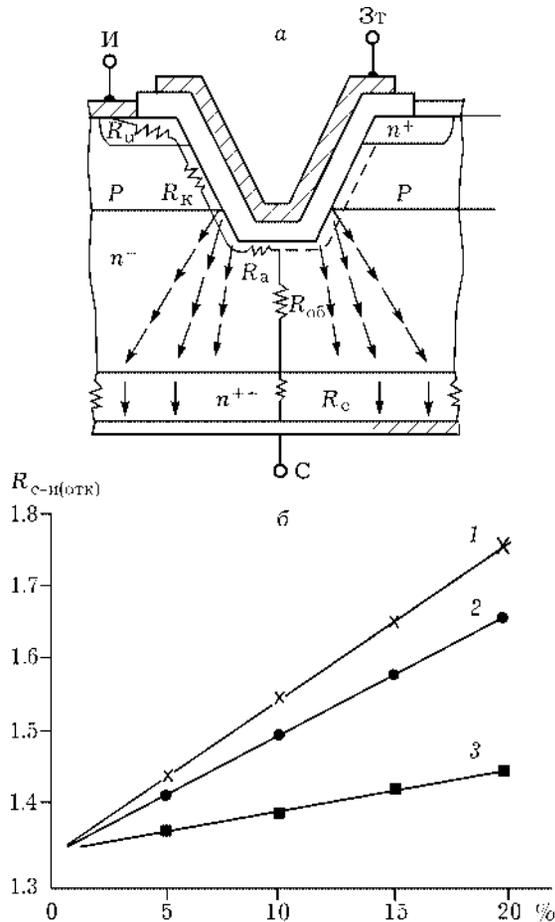


Рис. 2. Поперечное сечение транзистора (а) и зависимость сопротивления сток–исток в открытом состоянии ( $R_{с-и(отк)}$ ) от разброса толщины ( $\Delta h$ ) и удельного сопротивления ( $\Delta \rho$ ) высокоомного рабочего слоя  $n$ -канального мощного ВМОП-транзистора (б): 1 –  $R_{с-и(отк)} = f(\Delta h, \Delta \rho)$ ; 2 –  $R_{с-и(отк)} = f(\Delta \rho)$  при  $\Delta h = 0$ ; 3 –  $R_{с-и(отк)} = f(\Delta h)$  при  $\Delta \rho = 0$ .

ми значениями пробивных напряжений. Расчеты показали, что сокращение разброса удельного сопротивления и толщины высокоомного слоя с  $\pm 20$  до  $\pm 5$  % позволяет снизить протяженность канала прибора в 1.3 раза, что очень важно при решении проблем уменьшения массы и габаритов высоковольтных транзисторов.

Все вышесказанное относительно требований к однородности удельного сопротивления высокоомного слоя для МДП-транзисторов еще в большей степени относится к мощным тиристорам. Например, в тиристорах с рабочим напряжением, равным нескольким киловольтам, заданный номинал удельного сопротивления, например  $150 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , должен поддерживаться на пластине кремния ди-

аметром 80 мм с точностью в несколько процентов.

Для большинства мощных приборов в качестве исходных подложек используются многослойные структуры типа  $n-n^+$ ,  $p-p^+$ ,  $n-n^+-p^+$  и т. д. Изложенное выше позволяет довольно четко сформулировать требования к исходным многослойным структурам-подложкам для мощных высоковольтных МДП-транзисторов, IGBT-приборов, тиристоров:

- разброс удельного сопротивления ( $\Delta \rho$ ) и толщины ( $\Delta h$ ) высокоомного рабочего слоя не должен превышать  $\pm 5$  % (а желательно, и меньше) от номинала расчетного значения этой величины;

- плотность дефектов с размерами, соизмеримыми с глубиной  $n$ - $p$ -перехода стока в активных областях приборов, не должна превышать  $N_{\text{деф}} < 1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ , особенно в приповерхностных областях высокоомного слоя с глубиной  $h = h_{\text{ж стока}} + l_{\text{оду}}$ ;

- концентрация таких фоновых примесей, как кислород и углерод, в высокоомном рабочем слое должна составлять:  $N_{[O]} < 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{[C]} < 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  [2];

- необходимо исключить возможность образования паразитарного  $n$ - $p$ -перехода на границе раздела высокоомного рабочего и низкоомного слоев в процессе формирования приборных структур.

Основной особенностью развития технологии кристалльного производства мощных кремниевых приборов на данном этапе является то, что к традиционным методам изготовления многослойных структур-подложек (глубокой диффузии, прямой и обратной эпитаксии) добавился новый процесс, основанный на прямом соединении пластин кремния, так называемый direct bonding-process [3]. Мировой опыт, естественно, уже определил эффективность использования этих способов получения многослойных структур для мощных приборов: новая технология представляется более эффективной при изготовлении целого ряда мощных приборов с пробивным напряжением  $U_{\text{проб}} > 800 \text{ В}$ . В частности, еще в 1991 г. некоторые передовые фирмы заявляли, что шагом к реализации “разумных” мощных устройств на основе мощных МДП-транзисторов является переход на новую технологию [4].

Безусловно, выбор определенной технологии формирования исходных многослойных структур определяется экономической эффективностью использования того или иного процесса их получения. Эпитаксия или встречная диффузия – традиционные, хорошо “обкатанные” процессы с имеющимся парком оборудования для их проведения. Однако использование этих процессов при получении двух- и трехслойных исходных структур с верхним высокоомным слоем большой толщины (80–130 мкм) может быть неэффективно по ряду причин:

- при встречной диффузии, которая часто используется при производстве тиристорov, из-за высокой плотности дефектов и наличия значительного разброса толщины высокоомного слоя в результате размытия фронта диффузии при легировании на большую глубину, не говоря уже о большом расходе электроэнергии;

- при эпитаксии из-за проблемы автолегирования при росте толстых высокоомных пленок на сильнолегированных подложках [5], наличия разброса по толщине высокоомного слоя при росте толстых эпитаксиальных слоев, высокой плотности дефектов в толстых эпитаксиальных слоях и, наконец, возможности возникновения паразитарных  $n$ - $p$ -переходов на границе раздела слоев при формировании приборов из-за возможной диффузии, например, фоновой примеси бора из низкоомной подложки в высокоомную часть структуры (концентрация бора, в частности в материале ЭКЭС 0.01, как показали наши исследования, может превышать  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ).

Преимуществом технологии прямого соединения пластин применительно к силовой электронике является следующее:

- в качестве высокоомной рабочей области используется не эпитаксиальный слой, а слиточный монокристаллический кремний, полученный из специально подобранный слитка, обладающий высоким структурным совершенством и, при правильном подборе материала, высокой структурной термостабильностью;

- технология позволяет управлять профилем концентрации носителей заряда на границе раздела слоев формируемых структур путем варьирования режимов процесса подготовки поверхностей к соединению (рис. 3);

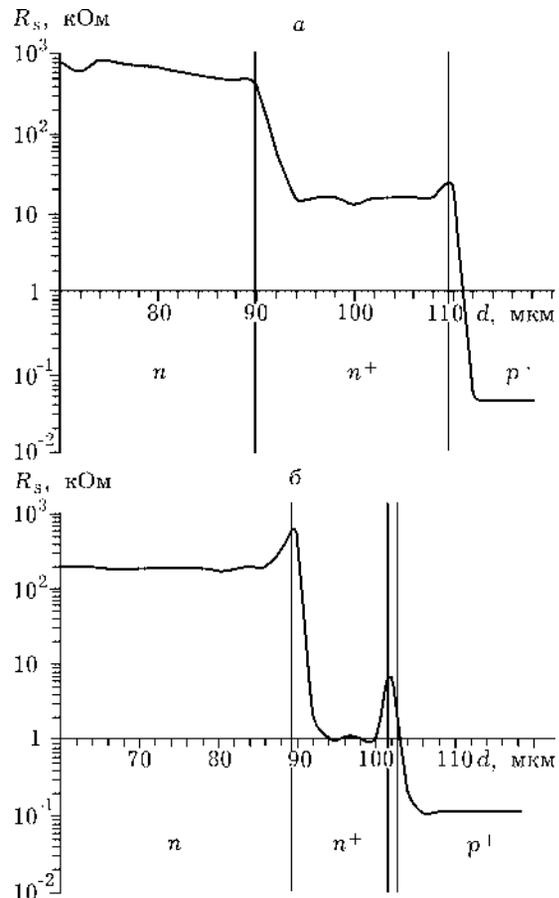


Рис. 3. Изменение сопротивления растекания ( $R_s$ ) в зависимости от глубины на границе слоев в структурах  $n^+-p^+$ , полученных прямым соединением кремниевых пластин, для двух разных технологических вариантов формирования многослойных структур.

- технология дает возможность получать структуры с разбросом по удельному сопротивлению и по толщине высокоомного рабочего слоя менее  $\pm 5\%$  при очень четком совпадении удельного сопротивления этого слоя с расчетными значениями.

Кроме того, технология прямого соединения позволяет формировать  $n$ - $p$ -переходы большой площади, что представляет интерес для оптимизации технологии выпрямителей. В частности, с использованием предварительного легирования высокоомной пластины были изготовлены диоды большой площади с коэффициентом идеальности 1.2–2.0 в диапазоне плотности тока  $5 \cdot 10^{-7}$ – $5 \cdot 10^{-1} \text{ А/см}^2$ , т. е. с коэффициентом идеальности в известной токовой зависимости, типичным для обычных диффузионных  $n$ - $p$ -переходов с аналогичными электрическими параметрами [6].

Сделанные в ходе работы уточнения требований к исходным многослойным кремневым структурам позволяют также определить свойства кремния, оптимальные для силовых высоковольтных приборов, сформированных как в биполярном варианте, так и для полевых транзисторов, а также модулей и интегральных схем на их основе:

– в случае эпитаксиального варианта для мощных приборов в качестве низкоомных подложек под эпитаксию должен использоваться кремний, выращенный методом Чохральского с содержанием углерода  $< 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и с низким содержанием остаточных примесей (концентрация их должна быть ниже концентрации легирующей примеси в высокоомном слое многослойной подложки);

– в случае однослойной подложки или многослойных подложек, формируемых глубокой диффузией или прямым соединением пластин, для полевых высоковольтных транзисторов, IGBT-приборов, тиристорных, высоковольтных диодов лучше использовать высокоомный нейтронно-легированный кремний, выращенный методом бестигельной зонной плавки с содержанием углерода не более  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Именно нейтронное трансмутационное легирование позволяет обеспечить очень высокую точность получения заданного значения удельного сопротивления (с точностью до 1 % и выше) и существенно более однородного распределения примеси с минимальной макро- и микро неоднородностью как в аксиальном, так и в радиальном направлении в слитке, хотя, безусловно, нейтронно-легированный кремний дороже материала, легированного традиционным способом, и на данном этапе практически невозможно проводить нейтронное легирование слитков диаметром более 150 мм.

Технология получения качественного нейтронно-легированного кремния достаточно сложна; в частности, высокие требования по однородности потока нейтронов сложно реализовать при облучении слитков длиной несколько десятков сантиметров и диаметром 100–150 мм, поскольку однородность потока нейтронов должна быть выше, чем требуемая однородность распределения доноров в кремнии. Концентрация радиационных дефектов, возникающих при нейтронном облуче-

нии, на несколько порядков превосходит концентрацию трансмутационного фосфора, причем концентрация и свойства радиационных дефектов, в частности их термическая устойчивость, зависят как от условий облучения (доза нейтронов, температура облучения, соотношение концентраций быстрых и тепловых нейтронов), так и от свойств исходного кремния [7].

Использование в качестве исходного материала кремния, выращенного традиционным методом Чохральского, при трансмутационном легировании нежелательно из-за наличия в этом материале высоких концентраций кислорода и его неоднородного распределения как по диаметру, так и по оси слитка. Дефекты, обусловленные наличием кислорода в материале, под действием облучения могут образовывать заряженные структурные нарушения, обладающие высокой термической стабильностью. Кроме того, некоторые врожденные нарушения кристаллической структуры исходного кремния, например свирл-дефекты, способны захватывать атомы фосфора, что препятствует расположению их в узлах решетки материала и получению требуемой однородности его удельного сопротивления.

Существует еще одна опасность при нейтронном легировании материала – это возможность его “запачкивания” в процессе облучения. Дезактивация, применяемая для удаления поверхностных радиоактивных загрязнений, не всегда исключает загрязнения примесями объема материала, поскольку некоторая доля атомов, адсорбированных в процессе облучения из воды канала на поверхностях образцов, при достаточно больших флюенсах тепловых нейтронов может проникать в приповерхностную область материала в процессе трансмутационного легирования. В частности, натрий и золото – радиоактивные изотопы, обнаруженные в заметных количествах в воде канала, – диффундируют в объем материала даже при малых флюенсах нейтронов, особенно натрия [8, 9].

Альтернативой кремнию, выращенному методом бестигельной зонной плавки, может быть кремний, выращенный в магнитных полях с содержанием кислорода менее  $4\text{--}5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (MCZ) [10]. Магнитное поле резко (до 6 по-

рядков) повышает вязкость расплава кремния, что в конечном итоге приводит к повышению микрооднородности кристалла. Кроме того, этим методом можно получать слитки кремния с содержанием кислорода до  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при более равномерном распределении этой примеси по объему слитка. Это позволяет практически избежать явления преципитации кислорода и образования нежелательных дефектов в рабочих областях приборов при приборных термообработках пластин.

Нами исследовались восемь слитков диаметром 76 и 100 мм, выращенных в переменных магнитных полях. На отдельных слитках, в частности, были получены следующие результаты:

– при диаметре 100 мм и массе 7 кг содержание кислорода на верхнем торце составляло  $[O_i] = (3.9 \pm 0.9) \%$ , на нижнем торце –  $(2.8 \pm 0.4) \%$ ; удельное сопротивление после нейтронного легирования верхнего торца составило  $(49 \pm 5) \%$ , нижнего –  $(48 \pm 4) \%$  [9].

Мы провели экспериментальное исследование оптимальности использования при изготовлении мощных высоковольтных диодов площадью  $0.5 \times 2 \text{ мм}$  и ДМОП  $n$ -канальных транзисторов на 500 и 1000 В (рабочие токи 4–5 А) составных структур, сформированных прямым соединением, где в качестве материала для формирования рабочего высокоомного  $n$ -слоя использовался кремний, выращенный методом Чохральского при стандартных режимах, нейтронно-легированный кремний, выращенный зонной плавкой, кремний, выращенный методом Чохральского в переменных магнитных полях.

Кроме того, часть приборов формировалась на многослойных структурах, полученных прямым соединением при использовании и высокоомного кремния, выращенного по Чохральскому при стандартных режимах, и низкоомного кремния марки КЭС 0.01 с модифицирующей добавкой. Приборы на всех партиях изготавливались в едином технологическом процессе. В качестве контрольных выступали аналогичные структуры  $n-n^+$ , формируемые эпитаксиальным наращиванием.

Наши исследования показали, что только использование многослойных структур, полученных прямым соединением, позволило

получить приборы класса А при формировании транзисторов с пробивным напряжением на 1000 В. Применение нейтронно-легированного кремния в качестве материала для высокоомного слоя в формируемых структурах-подложках позволило повысить выход чипов с требуемыми пробивными напряжениями в 1.3–1.4 раза по сравнению с аналогичными подложками, полученными эпитаксиальным путем, а использование в качестве материала для формирования низкоомной части кремния с модифицирующими добавками позволило полностью избавиться от транзисторов с “мягкими” характеристиками.

Эффективность применения того или иного метода формирования исходных структур-подложек под мощные высоковольтные приборы иллюстрирует рис. 4, где показана зависимость среднего выхода годных тестовых высоковольтных транзисторов с напряжением 500 и 1000 В от способа подготовки исходных структур-подложек, а также сто-

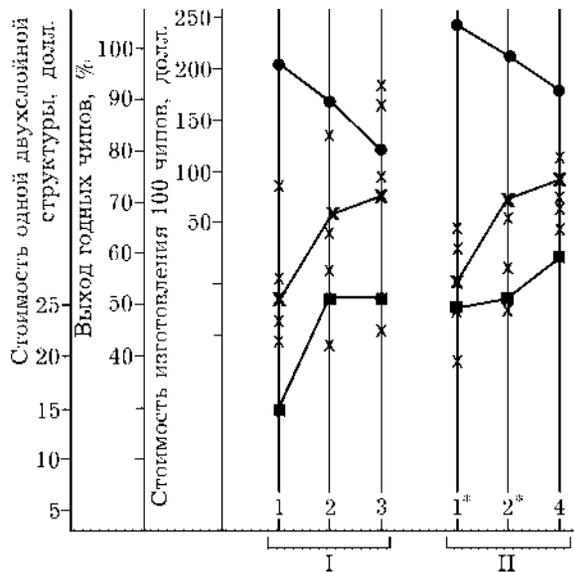


Рис. 4. Зависимость выхода готовых чипов (X), стоимости одной исходной двухслойной структуры (■) и стоимости изготовления 100 чипов (●) тестовых МОП-транзисторов на 500 (серия I) и 1000 В (серия II) от способа получения исходных двухслойных структур: 1 и 1\* – эпитаксиальные структуры, 2 и 2\* – структуры, полученные прямым соединением пластин из Si, выращенного методом Чохральского при стандартных режимах; 3 – структуры, полученные прямым соединением с использованием высокоомного Si, выращенного по Чохральскому с наложением магнитных полей; 4 – составные структуры с использованием высокоомного и нейтронно-легированного зонного Si.

имость одной такой подложки и экономическая эффективность, получаемая при изготовлении готовых чипов приборов на структурах-подложках, подготовленных разными способами. Как видно из рис. 4, использование составных структур-подложек с нейтронно-легированным кремнием в качестве материала для высокоомного рабочего слоя позволяет получить при изготовлении каждого ста чипов приборов с  $U_{\text{проб}} = 1000$  В экономию до 40–50 долл. по сравнению с использованием аналогичных эпитаксиальных структур.

Метод прямого соединения пластин позволяет также формировать структуры кремний на изоляторе (КНИ-структуры), монолитно соединяя пластины таким образом, чтобы между ними находился слой диэлектрика; как правило, это слой термического оксида. Разработка технологии получения таких структур также представляет интерес для силовой электроники. В частности, специалисты фирмы Supertex (США) предложили промышленный способ формирования “разумной” мощной интегральной схемы (Smart Power IC), рассчитанной на высокие значения тока и напряжения, на основе КНИ-структур, полученных методом прямого соединения пластин кремния (BSOI) [11]. При переходе к замене традиционных структур с диэлектрической изоляцией стоимостью 150 долл. структурами, изготовленными по новой технологии, интегральные схемы становятся более компактными и расходы на их производство сокращаются. Эти схемы содержат однооперационные тиристоры и представляют собой 40-канальный драйвер для мощных дисплеев, выходное напряжение каждого канала которого может достигать 300 В при токе 300 мА. Эти обстоятельства играют решающую роль при выборе мощных схем, изготовленных по технологии прямого соединения, в качестве элементной базы при производстве цветных дисплеев с плоским экраном, высоковольтных операционных усилителей и оборудования средств связи.

На международной конференции по электронным приборам в 1997 г. были представлены результаты работ по освоению промышленного производства таких схем. Применение технологии прямого соединения пластин позволило избежать таких традиционных

проблем, как нежелательное защелкивание и медленное переключение циклов зарядка-разрядка на двухслойных структурах, изготовленных по технологии прямого соединения.

## ВЫВОДЫ

1. Определены основные требования к материалу активных областей высоковольтных биполярных и полевых транзисторов. Экспериментально показано, что большой разброс удельного сопротивления и толщины высокоомного слоя многослойных исходных структур может приводить к увеличению длины канала приборов и снижению выхода годных приборов при формировании на них высоковольтных МДП-транзисторов.

2. Рассмотрены основные технологические варианты формирования исходных многослойных структур, используемых в качестве подложек при изготовлении основной массы мощных высоковольтных транзисторов, IGBT-приборов, тиристоров. Показано, что для формирования высокоомных слоев многослойных структур-подложек под мощные транзисторы с  $U_{\text{проб}} > 800$  В эффективно использовать нейтронно-легированный кремний, выращенный бестигельной зонной плавкой или методом Чохральского с наложением магнитных полей и содержанием кислорода менее  $4-5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 В. В. Бачурин, В. П. Дьяконов, А. Б. Левин и др., *Электричество*, 3 (1986) 56.
- 2 M. Watanabe, *J. Solid State Technology*, March (1991) 69.
- 3 S. Bengtsson, *J. Electronic Materials*, 21, 8 (1992) 841.
- 4 Albleiter im Jahre 2000, *Elektronik Industrie*, 11 (1992) 102.
- 5 Р. В. Харламов, Ю. А. Михайлов, *Материалы электронной техники*, 1 (1999) 22.
- 6 В. М. Волле, В. Б. Воронков, И. В. Грехов, В. А. Козлов, *Письма в ЖТФ*, 15, 18 (1989) 59.
- 7 Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников, Под ред. Дж. Миза, Мир, Москва, 1982, с. 262.
- 8 Т. П. Свистельникова, В. А. Харченко, А. А. Стук, *Неорганические материалы*, 23, 1 (1987) 152.
- 9 Т. В. Моисеевская, Т. П. Свистельникова, А. А. Стук и др., Там же, 26, 1 (1990) 5.
- 10 В. Б. Освенский, В сб.: *Фундаментальные проблемы российской металлургии на пороге XXI века*, изд. РАЕН, Москва, 1998, т. 4, с. 85.
- 11 К. Л. Енишерлова, Ю. А. Концевой, *Материалы электронной техники*, 4 (2000) 4.