

Д. т. н. С. П. НОВОСЯДЛЫЙ, В. М. ВИВЧАРУК

Украина, г. Ивано-Франковск, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаника
E-mail: nsp@pu.if.ua, vivov@bigmir.net

Дата поступления в редакцию
24.06 2008 г. — 30.01 2009 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. В. КАРИМОВ
(НПО «Физика–Солнце», г. Ташкент)

ФОРМИРОВАНИЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С ИЗОЛЯЦИЕЙ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОКИСЛЕННЫМ ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

Разработана технология горизонтальной и вертикальной изоляции элементов БИС на основе пористого кремния, исследована возможность его использования для формирования МОП-транзисторов.

Современная субмикронная схемотехника требует размещения на одном кристалле совмещенных аналоговой, цифровой и силовой частей функциональной схемы. Соответственно, такие схемы должны реализовываться с использованием как биполярных, так и полевых транзисторов, т. е. в одном технологическом маршруте должны быть совмещены биполярная, КМОП- и ДМОП-технологии. Совместить эти технологии можно только на базе кремниевых эпитаксиальных структур (КЭС). С другой стороны, эпитаксиальный кремний позволяет качественно формировать очень тонкий подзатворный диэлектрик, который лишен туннельного эффекта. Кроме того, современные КЭС можно реализовывать также с локальной эпитаксией [1—3]. Переход на сверхтонкие функциональные слои требует качественной изоляции активных элементов и обеспечения их высокой радиационной стойкости. Здесь лидирует так называемая SOI-технология (Silicon-On-Insulator), которую называют еще КНИ (кремний-на-изоляторе). Существует много методов ее реализации, каждый из которых имеет как преимущества, так и существенные недостатки [1, 4, 5].

МОП-транзисторы, изготовленные по технологии «кремний-на-изоляторе», очень перспективны для создания мощных и высокоскоростных БИС с напряжением питания не выше 1,2 В, т. к. наличие толстого окисла вместо кремния под областями истока и стока существенно уменьшает величину емкости между ними и подложкой. Вторым преимуществом является достаточно надежная изоляция активных компонентов (хотя технология ее получения довольно сложна) и высокая степень интеграции благодаря отсутствию изолированных *n*- или *p*-карманов.

В данной статье предложен новый метод формирования эпитаксиальных структур для технологии «кремний-на-изоляторе».

В основе существующей SOI-технологии лежат два метода диэлектрической изоляции для изготовления пластин КНИ — метод SmartCut и метод

DeleCut. Фактически, второй метод является модернизацией первого. Оба они достаточно дороги и имеют большие технологические трудности. Рассмотрим физические процессы, лежащие в их основе, и проанализируем их технологичность и себестоимость.

Имплантационный метод (SmartCut) предусматривает внедрение в глубину Si-пластины ионов кислорода, которые и формируют скрытый слой окисла на глубине 0,5—0,6 мкм.

Метод водородного переноса кремния с окислом (DeleCut) заключается в прямом сращивании облученной водородом донорной окисленной Si-пластины с опорной подложкой с последующим почти полным удалением донорной пластины путем ее отслоения внедренным водородом. Имплантация ионов водорода (H^+) проводится через тонкий слой SiO_2 , который после легирования стравливается. В результате доза атомов водорода, необходимая для отслоения (скола) тонкой пленки кремния, уменьшается до величины $(3—5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, которая и является оптимальной. Такой метод формирования значительно уменьшает толщину границы раздела Si– SiO_2 , которая составляет лишь 0,3—0,6 нм. В методе SmartCut толщина этого переходного слоя составляет примерно 3 нм.

Таким образом, основной особенностью способа изготовления структур DeleCut является формирование скрытого диэлектрика (SiO_2 термического) на облученной Si-подложке, что предопределяет очень низкую плотность радиационных дефектов. Вторым важным преимуществом этого метода является практически полное отсутствие термомеханических напряжений, влияющих на термическую стабильность.

Как кислородный имплантационный, так и водородный методы формирования изоляции являются очень прецизионными и дорогими.

Эксперимент и моделирование процесса

В данной статье предлагается универсальная структура БИС, созданная по совмещенной Би-К-Д-МОП-технологии. В этой структуре изоляция окислом заменяется на оксинитридную изоляцию и изоляцию окисленным пористым кремнием.

Вернемся к структуре МОП-транзистора, сформированной по SOI-технологии (рис. 1). К недостаткам ее методов изоляции следует отнести следующее.

1. Высокоэнергетическое кислородное внедрение (SmartCut) требует применения дополнительного диэлектрика типа полиимида и вводит значительные ра-

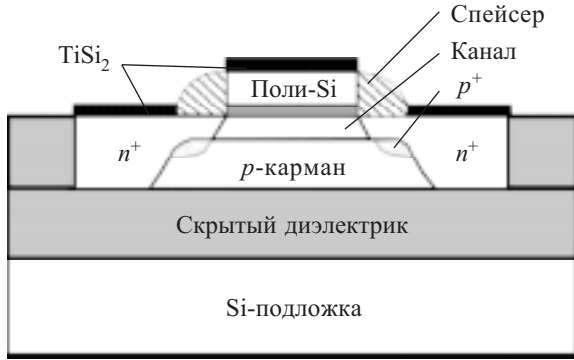


Рис. 1. SOI-структура МОП-транзистора

диационные повреждения, которые увеличивают толщину межфазной границы раздела Si-SiO₂.

2. Водородный метод сращивания Si-пластин (DeleCut) требует очень высокого качества Si-подложек по плоскостности и введения дополнительной механической операции полирования исходных пластин, которая вносит дополнительную дефектность.

Мы предложили технологию формирования КЭС для технологии SOI, которая позволит формировать все три вида транзисторов — биполярные, КМОП и ДМОП [6, 7].

Первой особенностью данной технологии является использование эпитаксиального монокремния, который наносится на Si-подложку методами молекулярно-лучевой или газовой эпитаксии. Это позволяет формировать высококачественный подзатворный диэлектрик, т. к. в таком монокремнии отсутствуют изоконцентрационные примеси кислорода и углерода, которые всегда присутствуют в монокристаллах, полученных по методу Чохральского.

Кроме горизонтальной (латеральной) диэлектрической изоляции, в КНИ-структурах осуществляется также вертикальная изоляция. Для SOI-структур используют три широко распространенных метода вертикальной изоляции: локальное оксидирование кремния (Locos), изоляция мелкими канавками (STI) и мезаизоляция. При нормах проектирования меньше 0,25 мкм Locos-изоляцию очень сложно применять,

поскольку ее технология ограничивает возможность получения изолированных карманов малой площади. STI-изоляция является достаточно дорогим процессом для реализации субмикронных многоуровневых структур [1, 3, 6].

Для субмикронной SOI-технологии мы предлагаем новые методы получения латеральной изоляции.

1. *Радикальное многозарядное внедрение N₂O⁺⁺* проводят через тонкий окисел в эпитаксиальный кремний на глубину 0,6—1,0 мкм. После активации не только формируется качественный изолирующий оксинитридный слой, но и образуется эффективная внутренняя гетеросистема с переходной границей раздела минимальной толщины.

2. *Окисление пористого монокремния.* На определенной глубине КЭС формируется пористый монокремний, область которого определяется степенью легирования бором монокремния эпитаксиального слоя.

Первый метод имеет преимущество перед высокоэнергетическим кислородным внедрением (SmartCut), т. к. может осуществляться при энергии и дозе ионов почти в два раза меньшей без применения дополнительной полиимидной маски. Изолирующие и гетерирующие свойства такой изоляции легко контролируются по показателю преломления слоя и инфракрасным спектрам.

В основе второго метода положен процесс окисления пористого кремния, который получают при анодной электрохимической обработке моно-Si в растворе на основе плавиковой, соляной и надуксусной кислот (HF:HCl:CH₃COOH=5:4:1). Здесь надуксусная кислота выступает как сильный смачиватель и окислитель, соляная кислота — как отборник, пассиватор и транспортер водорода, а плавиковая — как растворитель оксида. Кремниевая пластина в таком процессе (рис. 2) является анодом, а катодом служит платиновый электрод.

Впервые пористый кремний был получен в середине 50-х годов в ходе исследования процесса электрохимического полирования поверхности кремния в водородном растворе HF [8] (для изоляции не применялся в силу ограниченности экспериментов).

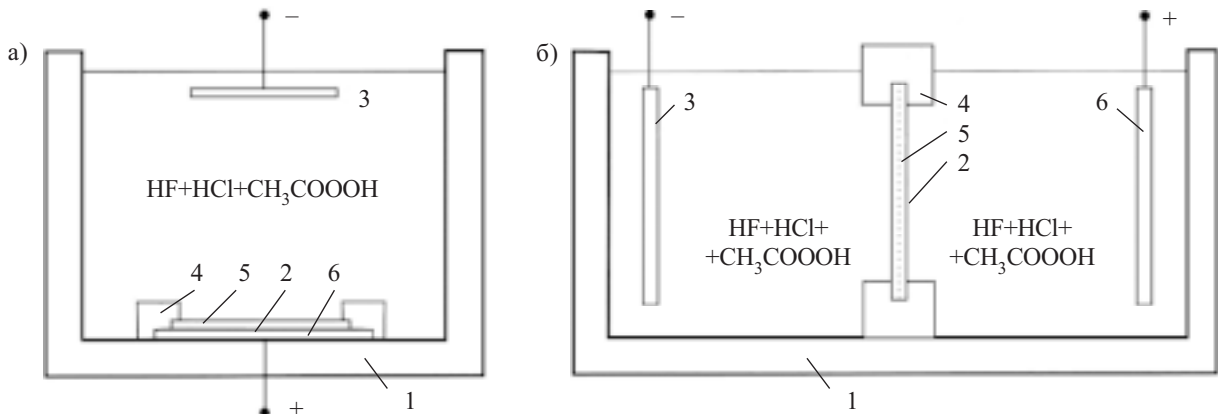


Рис. 2. Электрохимические ячейки-ванны для формирования слоя пористого Si:

а — вертикального типа; б — двухкамерная ячейка с жидкостным контактом к Si; 1 — фторопластовая ванна; 2 — Si-подложка; 3, 6 — платиновые электроды; 4 — уплотнители; 5 — слой пористого Si

Такая операция необходима для доведения рабочей поверхности до зеркального состояния. В ходе экспериментального травления было обнаружено, что при определенных режимах (низкой плотности анодного тока и высокой концентрации HF в электролите) вместо процесса электрополирования наблюдается образование определенных пленок на поверхности кремния. Нашими исследованиями было установлено, что такие слои имеют в своем объеме мелкие поры. Формирование пор начинается на поверхности Si-пластин, и на протяжении определенного времени анодной обработки края пор достаточно глубоко проникают в объемный кремний. В результате такой обработки толщина пленки пористого кремния в зависимости от времени травления может изменяться от нескольких единиц до сотен микрометров.

Проведенные ранее исследования [8] установили следующее. Поверхность Si при контакте с растворами, содержащими HF, пропитывается водородом и становится химически инертной по отношению к электролиту. Если на электроды (рис. 2) подать напряжение, то дырки в Si освобождаются от блокирующего действия водорода и мигрируют к поверхности раздела «кремний—электролит». При этом атомы Si тоже освобождаются от блокирующего действия водорода и начинают взаимодействовать с ионами и молекулами электролита и переходят в раствор. Если электролиз проводить при высокой плотности тока, то к поверхности электрода поступает большое количество дырок. Они двигаются к границе раздела «кремний—электролит» сплошным фронтом и обеспечивают реакционную способность практически каждому атому Si. Так как микровыступы на поверхности Si-пластин занимают большую поверхность, чем ровные области, то они растворяются быстрее. Таким образом, поверхность кремниевого анода постепенно выравнивается, и в этом случае мы получаем режим электрохимического полирования поверхности Si-пластин.

Если же электролиз проводить при сравнительно низкой плотности анодного тока, то количества дырок уже недостаточно для организации сплошного фронта, и поэтому проходит локальное растворение кремния на поверхности. Зарождение пор при этом может начинаться на микроямках или дефектах поверхности Si. Со временем такие поры продолжают свой рост в глубину кремния за счет дрейфа дырок к краям пор, где напряженность электрического поля достаточно высока.

Очевидно, что в кремнии *n*- и *p*-типов количество дырок разное, и потому процессы создания пор в *n*-Si и *p*-Si имеют свои особенности. В *p*-Si дырки являются основными носителями заряда, и их концентрация составляет 10^{14} — 10^{18} см⁻³. В этом случае, как правило, формируется тонкая высокопористая структура с порами нанометровых размеров. В *n*-Si, где основными носителями заряда являются электроны, их концентрация большая, а дырок — очень малая (10^2 — 10^6 см⁻³). В этом случае усилить анодный ток можно за счет фотогенерации (при подсвечивании Si-электрода) или за счет лавинной генерации (при высоких напряжениях или напряженностях электриче-

ского поля). Полученная таким образом структура отличается от предыдущей и характеризуется наличием пор достаточно больших размеров. Следовательно, изменяя условия анодирования, можно получить пористый Si с разной морфологией пор.

Экспериментальные исследования процесса анодирования показали, что на поперечный размер пор *R* влияют ток анодирования, состав электролита, уровень и вид легирования, время и уровень подсвечивания. Размер пор может изменяться от 10 мкм до 1 нм. По существующей классификации [8] пористый кремний делится на микропористый ($R < 2$ нм), мезапористый ($2 \text{ нм} < R < 50$ нм) и макропористый ($R > 50$ нм). Для пористого Si объем пор находится в пределах 5—95% от общего объема. Когда объем, занимаемый порами, мал (5%), пористый Si по свойствам близок к монокристаллу, а при высоких значениях пористости (>50%) в кремнии проявляются новые уникальные свойства, обнаруженные в наших экспериментах.

Характеристикой пористости Si является суммарная площадь его внутренней текстурированной поверхности, которая, в зависимости от величины пористости и геометрии пор, может составлять для макропористого кремния 10—100 м²/см³, для мезапористого 100—300 м²/см³ и для микропористого 300—800 м²/см³. Для сравнения стоит отметить, что удельная поверхность монокристаллического кремния составляет лишь 0,1—0,3 м²/см³.

Известно, что диэлектрическая пленка SiO₂, полученная методом термического оксидирования кремния, не может быть толще 1,5 мкм. Для создания толстых диэлектрических пленок окислов SiO₂ следует использовать именно пористый Si. Если такой материал подвергнуть термическому оксидированию, то уже при температуре $T > 900^\circ\text{C}$ за счет пористости системы молекулы кислорода способны проникать на всю толщину пористого Si, обеспечивая его быстрое полное окисление (скорость окисления возрастает на порядок и больше). Исследованиями установлено, что для такого процесса оптимальная пористость слоев составляет 45—49%. В зависимости от условий анодирования параметры пористого кремния изменяются в широком интервале: удельное сопротивление — от 10^{-2} до 10^{11} Ом·см, диэлектрическая проницаемость — от 1,75 до 12, коэффициент преломления — от 1,2 до 3,5. Именно для реализации латеральной и вертикальной изоляции в КНИ-структурах нами предложено использовать анодированный пористый кремний с удельным сопротивлением 10^{10} — 10^{12} Ом·см.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что кремний с пористостью $P \leq 30$ —35% может быть надежной основой для формирования на нем слоя эпитаксиального монокремния. Поэтому латеральную диэлектрическую изоляцию можно выполнять как до, так и после формирования эпитаксиального слоя. Пористость кремния, сформированного на моно-Si, определяется по формуле [8]

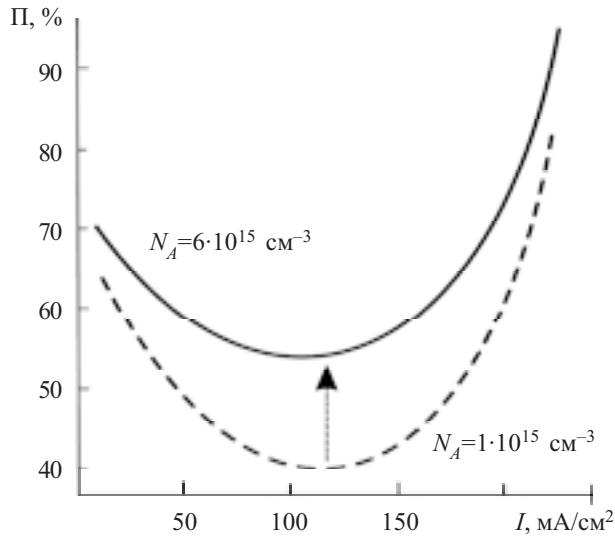


Рис. 3. Зависимость пористости Si от плотности анодного тока для электролита состава HF:HCl:CH₃COOH=5:4:1 и различной концентрации бора

$$\Pi = \frac{n_{Si} - n_{i\epsilon}}{n_{Si} - n_a} \cdot 100\%,$$

где n_{Si} , $n_{ик}$, n_b — коэффициенты преломления моно-Si, пористого Si и воздуха.

Скорость роста пористого Si тем выше, чем выше степень легирования монокремния бором. Оптимальная концентрация акцепторной примеси составляет $N_A = (1-6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Легирование бором можно легко реализовывать как в процессе эпитаксиального роста монокремния, так и многозарядной имплантацией бора B^{++} или BF_2^{++} на глубину 0,7—1,0 мкм [9].

Как показали исследования, величина пористости определяется плотностью анодного тока (рис. 3), составом электролита, степенью легирования бором кремния и содержанием O_2 и C в кремниевых пластинах Чохральского. Изменяя содержание плавико-

вой и надуксусной кислот, можно ускорять или замедлять процесс роста (HF — ускоряет, HCl — пассивирует, CH_3COOH — замедляет), регулировать размер пор содержанием соляной (или серной) кислоты.

При термическом окислении пористого Si с пористостью более 70% происходит резкое уплотнение окисленного пористого Si уже при $T=900^\circ\text{C}$ в атмосфере сухого кислорода. При $T=800^\circ\text{C}$ и при повышенном до 10 атм. давлении (на установке «Термоком») скорость окисления увеличивается на порядок и может достигать 10 мкм/ч. Использование закиси азота N_2O вместо кислорода позволяет формировать не только латеральные изолирующие слои, но и гетероструктуры на основе оксинитрида кремния $Si_xN_yO_z$. Это и составляет особенность предложенной технологии.

Разработанный нами технологический процесс окисления пористого кремния позволил реализовать изолирующие области монокремния длиной до 10 мкм при боковом окислении под фотомаску нитрида кремния на глубину <0,25 мкм.

В изолированных карманах были сформированы обычные тестовые *n*- и *p*-канальные МОП-транзисторы с длиной канала 0,8—1,0 мкм и с пороговым напряжением $U_{Tn}=0,5-0,8 \text{ В}$ и $U_{Tp}=0,7-1,1 \text{ В}$, соответственно. Пороговые напряжения измерялись при напряжении затвора, который обеспечивал уровень тока стока в 1 мкА при сток-истоковом напряжении 5 и 3,5 В. Токи потерь, измеренные при напряжении сток-исток 5 и 0 В на затворе, не превышали уровня $5 \cdot 10^{-13} \text{ А}$ на 1 мкм длины канала. Выходные ВАХ таких КМОП-транзисторов показаны на рис. 4.

Был проверен ряд экспериментальных моделей МОП-транзисторов для субмикронной КНИ-технологии, определены основные критерии выбора материалов и технологий.

1. *Подзатворный диэлектрик.* При переходе в субмикронные топологические размеры каналов МОП-транзисторов необходимо уменьшить туннель-

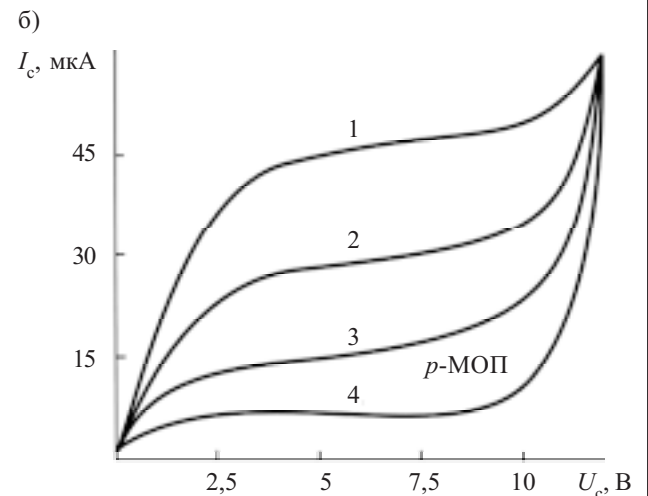
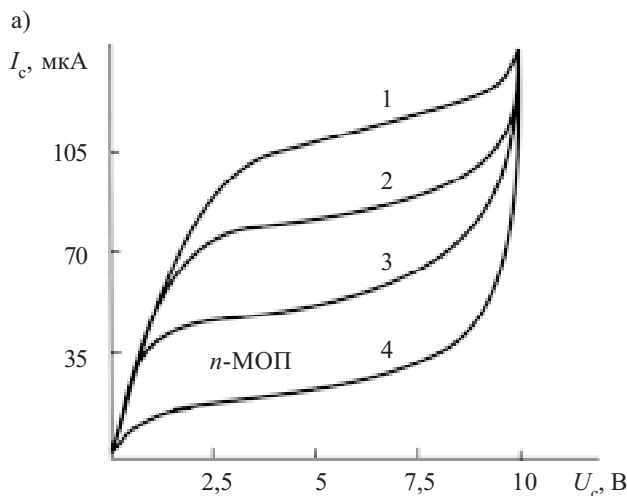


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики *n*-МОП (а) и *p*-МОП (б) транзисторов с длиной канала 1 мкм и шириной 2,5 мкм для различных значений напряжения на затворе: 1 — 7 В; 2 — 6 В; 3 — 5 В; 4 — 4 В

ные токи и повысить электрическую прочность подзатворного диэлектрика до 10^7 В/см, что достигается легированием окисла редкоземельными металлами (Ho, La, Y), используя их хлориды. Это соответственно увеличит диэлектрическую постоянную подзатворного диэлектрика SiO₂ в несколько раз.

2. *Сток-истоковые контакты.* Для обеспечения низкого переходного сопротивления контактов (рис. 1) ретроградный концентрационный профиль n^+ -областей выполняется многозарядной имплантацией ионов мышьяка (As⁺⁺), а сток-истоковых n -областей — радикальным легированием PF₃⁺⁺. На области истока, стока и затвора осаждают слой дисилицида титана TiSi₂, который формируется газофазной реакцией пиролиза моносилана (дисилана) и хлорида титана TiCl₄ в реакторе пониженного давления типа «Изотрон-3» при температуре 590°C. Удельное поверхностное сопротивление такой пленки, сформированной на основе аморфного кремния, составляет меньше 10 Ом/□.

3. *Канал МОП-транзисторов.* Для обеспечения высокого быстродействия n - и p -канальных МОП-транзисторов (они могут быть как инверсионными, так и встроенными) в областях каналов проводят ионное легирование германия. В зависимости от степени такого легирования подвижность носителей заряда (как электронов, так и дырок) может быть увеличена вдвое. Короткоканальный эффект смыкания сток-истоковых областей полностью устраняется формированием p^+ -карманов с помощью радикальной имплантации BF₂⁺⁺ для p -кармана и PF₃⁺⁺ для n -кармана. Защита затворной системы надежно обеспечивается нитридными или оксинитридными спейсерами, которые наращиваются на боковые стенки затворной системы, чтобы обеспечить профилирование вертикальных стенок и устранить обрывы на ступеньках окислов. Для обеспечения необходимых значений порогового напряжения проводится также радикальное многозарядное ионное легирование канала.

4. *Тестовые элементы* позволяют определить электрофизические параметры технологии формирования КНИ-структур и проектные нормы конструкторско-технологических ограничений. Набор тестовых элементов формирует тестовую структуру, с помощью которой контролируется весь технологический процесс SOI на основе пористого кремния.

Выводы

Разработана новая технология горизонтальной (латеральной) и вертикальной изоляции субмикронных

структур на основе окисленного пористого кремния на любых пластинах монокремния при обеспечении легированного p -слоя с концентрацией $(3—6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Увеличение быстродействия МОП-транзисторов, сформированных на основе КНИ-структур, достигается благодаря легированию канала германием, и в зависимости от дозы легирования подвижность основных носителей заряда может вырасти вдвое и больше.

На пористых кремниевых структурах можно также создавать высококачественные униполярные конденсаторы большой емкости.

Получены проектные нормы КНИ-технологии, которые могут быть определены только моделированием этих структур при помощи TCAD или Cadence.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем.— Івано-Франківськ: Сімик, 2003.
2. Новосядлий С. П. Технология формирования высококачественных кремниевых эпитаксиальных структур // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 1998.— № 3—4.— С. 11—14.
3. Новосядлий С. П. Технологія формування КЕС для високовольтних Ві-К-МОН ВІС // Матеріали VII Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок.— Івано-Франківськ.— 2001.— С. 214—215.
4. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— М: Техносфера, 2002.
5. Pindl S., Berthold J., Hutner T. et al. Philips born 130-nm channel length partially depleted SOI CMOS-technology. // IEEE Trans. on Electron Devices.— 1999.— Vol. 46, N 7.— P. 1562—1566.
6. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні особливості формування локальної ізоляції активних областей ВІС канавками // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка.— 2000.— № 35.— С. 122—127.
7. Новосядлий С. П. Підвищення ефективності локальної ізоляції активних елементів ВІС // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка.— 1994.— № 34.— С. 177—185.
8. Балагуров Л. А. Пористый кремний: получение, свойства, возможные применения // Материаловедение.— 1998.— Вып. 1.— С. 50—56.— Вып. 3.— С. 23—45.
9. Новосядлий С. П., Бережанський В. М. Багатозарядна іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишень і металізації субмікронних структур ВІС // Металофізика і новітні технології.— 2007.— Т. 29, № 7.— С. 857—866.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Динамика радиоэлектроники — 2 / Под общей редакцией Ю. И. Борисова.— М.: Техносфера, 2008.— 376 с.

Книга о динамике развития радиоэлектроники — одной из наиболее важных составляющих научно-технического прогресса общества, во многом определяющей его социальные и оборонные возможности. Материалы книги подготовлены группой ученых и инженеров, непосредственно принимавших участие в исследованиях, разработках, испытаниях и применении изделий электронной техники и радиотехнической аппаратуры.

Для читателей, интересующихся созданием и развитием радиоэлектроники и условиями, в которых проходило ее становление в СССР.