

УДК 004

Анализ технологических процессов формирования межтранзисторной изоляции

10, сентябрь 2012

Гладких А.А., Столяров А.А.

Научный руководитель: член-корр. РАН, д.т.н, профессор Шахнов В.А.

Научные консультанты: доцент, к.т.н. Макаруч В.В., к.ф-м.н. Амирханов А.В.

1 - Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра «ИУ-4»

2 - Россия, Москва, НИИСИ РАН

МГТУ им. Н.Э. Баумана
GladkikhAlexei@gmail.com

Введение

Известно, что элементной базой современной электронно-вычислительной аппаратуры являются сверхбольшие интегральные микросхемы (СБИС). Причем процесс их развития и совершенствования неразрывно связан с ростом их сложности, который выражается в непрерывном увеличении числа элементов СБИС.

Если иное не требуется согласно принципиальной схеме цифрового устройства, то в СБИС активные области каждого транзистора должны быть изолированы друг от друга. В настоящее время промышленно применяются два вида технологических решений, позволяющие решить эту задачу для активных областей транзисторов типа металл-окисел-полупроводник (МОП): *LOCOS (LOCAl Oxidation of Silicon)* и *STI (Shallow trench isolation)*. Отметим, что для производства СБИС с минимальным критическим размером *500 нм* и менее предпочтение отдано *STI*-процессу, поскольку он позволяет обеспечить более плотное размещение транзисторов на кристалле.

В технологической последовательности формирования *STI* используется операция химико-механической планаризации (ХМП) поверхности кристалла будущей СБИС, которая, как известно из работ [1, 2], не может обеспечить равную толщину остаточного диоксида кремния между островками транзисторных структур, в результате чего поверхность кристалла будущей СБИС имеет остаточный рельеф поверхности. Для его минимизации применяют различные конструктивные методы [1, 3], в том числе и методы, основанные на моделировании операции ХМП.

В работе [4] рассмотрены модели операции ХМП для блока технологических операций формирования многоуровневой металлизации, а в работе [5] приведена модель операции ХМП для *STI*-процесса. Однако эта модель не учитывает особенностей такого *STI*-технологического процесса формирования многоуровневой металлизации (она будет рассмотрена далее), при которой над островками транзисторных структур перед операцией ХМП на поверхности слоя диоксида кремния возникает двойная ступенька.

В предлагаемой статье рассмотрены два варианта технологической реализации *STI*-процесса: стандартный вариант, в котором в качестве изолирующего слоя используется нитрид кремния и планаризация проводится до вскрытия всех областей нитрида, и

вариант *STI*-процесса, в котором планаризация завершается до достижения областей защитного слоя, в качестве которого используется диоксид кремния. Для стандартного процесса рассмотрена модель операции ХМП, предложенная в работе [5], которая позволяет рассчитать разброс в толщины диэлектрика в изоляционной канавке между транзисторными структурами после проведения операции ХМП.

Формирование межтранзисторной изоляции

При производстве СБИС изоляция транзисторных структур друг от друга осуществляется на начальных этапах технологического маршрута производства (*Front-End Of Line, FEOL*). Как уже было упомянуто выше, *STI*-процесс применяют для электрической изоляции друг от друга транзисторных структур с минимальной проектной нормой 500 нм и менее, тогда как для СБИС, имеющих большую минимальную проектную норму, используют более простой и дешевый вариант техпроцесса локального окисления кремния (*LOCOS*).

Он состоит из следующих технологических операций:

1. Формирования тонкого слоя двуоксида кремния SiO_2 на поверхности пластины.
2. Осаждения на него слоя нитрида кремния Si_3N_4 , служащего маской для формирования изолирующих областей.
3. Формирования фоторезистивной маски (ФРМ), необходимой для получения областей под изоляцию.
4. Травления нитрида кремния по полученной ФРМ.
5. Термического окисления тех областей, с которых удален нитрид кремния.
6. Удаления оставшегося нитрида кремния с помощью селективного травления.

Основным недостатком этой технологии является эффект так называемого «птичьего клюва» (рисунок 1). Именно его наличие не дает возможным получить высокую плотность размещения активных компонентов СБИС вследствие разрастания слоя двуоксида кремния под нитрид кремния во время процесса термического окисления. Сразу заметит, что этот эффект полностью отсутствует в *STI*-процессе.

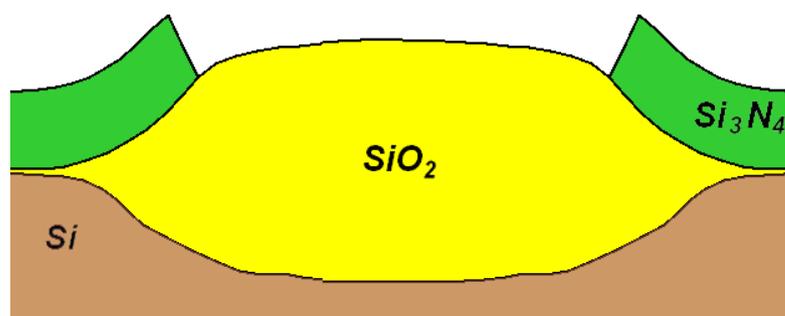


Рис. 1 – Эффект «птичьего клюва», возникающий в технологии LOCOS

В свою очередь *STI*-процесс, хотя и позволяет получить более высокую плотность размещения компонентов СБИС на поверхности кристалла по сравнению с *LOCOS*-процессом, но является более дорогостоящим, поскольку требует выполнения более сложных технологических операций.

Сам *STI*-процесс показан на рисунке 2. Как видно из рисунка он состоит из операций формирования тонкого слоя диоксида кремния, осаждения на него защитного слоя нитрида кремния, создания ФРМ, травления структуры $Si_3N_4/SiO_2/Si$ на заданную глубину в изолирующих областях по сформированной ФРМ, удаления ФРМ, термического окисления кремния в канавках, осаждения диэлектрического слоя и удаления лишнего диэлектрика с помощью операции ХМП. Наконец на заключительном этапе процесса удаляется слой нитрида кремния.

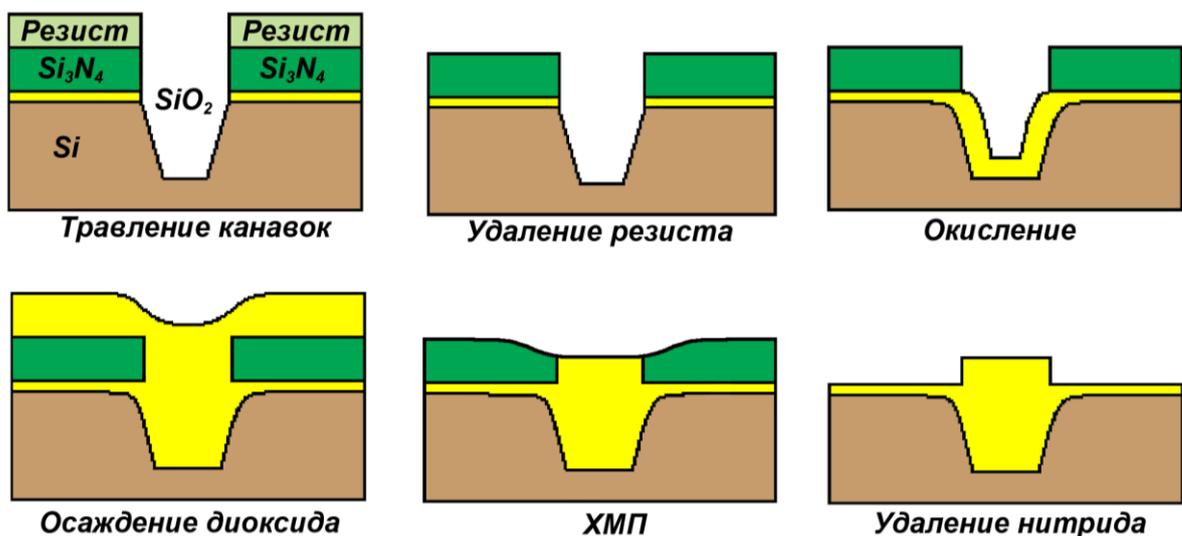


Рис. 2 – Технология мелкощелевой изоляции (*STI*)

Следует отметить различные функции слоя нитрида кремния в рассматриваемых процессах. Если в первом случае он предотвращает рост окисла на поверхности пластины при термическом окислении, то во втором – защищает поверхность активных областей кристалла от повреждения при выполнении операции ХМП и выполняет роль селективного к окислу стопорного слоя. В идеальных условиях после операции ХМП должны быть выполнены следующие условия:

1. Диоксид над нитридом кремния должен быть полностью удален.
2. Недопустимо удаление слоя SiO_2 между активными областями ниже уровня Si_3N_4
3. Во время операции ХМП толщина слоя Si_3N_4 должна оставаться постоянной.

В реальных условиях производства СБИС полное выполнение всех вышеперечисленных требований невозможно по двум основным причинам: в силу естественной изменчивости операции ХМП и конструктивных параметров схемы – различия в плотностях заполнения областей топологии кристалла СБИС.

Для *STI*-процесса плотность размещения активных областей транзисторов влияет на скорость планаризации различных участков кристалла СБИС, что является причиной либо неполного удаления диоксида кремния с одних областей кристалла, либо повреждения островков транзисторных структур в других его областях. Оба этих возможных случая показаны на рисунке 3.

Получение работоспособных СБИС с кремниевой пластины требует, чтобы поверхность нитрида кремния была полностью «очищена» от диоксида кремния. В противном случае на участках травления останется материал, который в дальнейшем будет мешать, как формированию поликремниевых затворов, так и легированию кремния. Чтобы, по возможности, этого избежать время планаризации надо выбирать минимально необходимым для того, чтобы диоксид кремния в областях с высокой плотностью заполнения рисунка топологии был полностью удален. Благодаря высокой селективности планаризации нитрида и диоксида кремния при малых временах проведения процесса ХМП значительного удаления диоксида кремния в канавках даже в областях кристалла СБИС с низкой плотностью заполнения нитридом кремния удастся избежать. Однако при больших временах проведения процесса планаризации, избежать удаления диоксида кремния в канавках между активными областями не удастся.

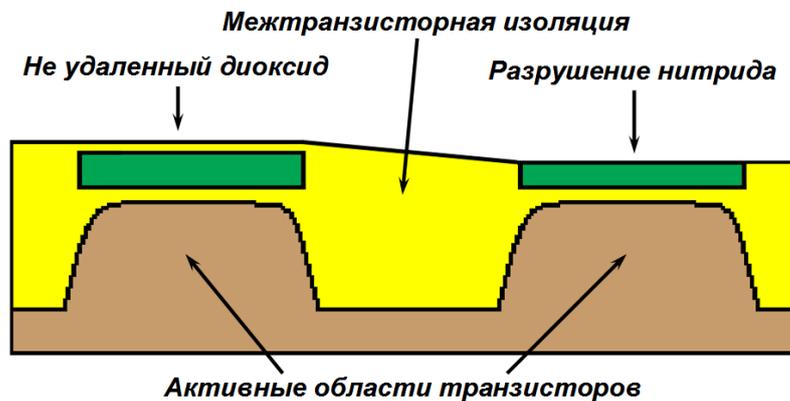


Рис. 3 – Дефекты, возникающие на этапе планаризации в *STI*-процессе

Другая проблема больших времен процесса планаризации состоит в разрушении или утонении слоя нитрида кремния над транзисторными областями, которое называют эрозией нитрида («*nitride erosion*») и которая количественно определяется как толщина слоя нитрида удаленного в процессе планаризации. Излишнее удаление диоксида кремния между островками транзисторных структур и эрозия нитрида приводят к проблемам с электрическими характеристиками элементов СБИС: возникновением боковой паразитной проводимости и высокой напряженности электрического поля в подзатворном окисле на границах транзисторных областей. Отметим, что высокая напряженность электрического поля на острых углах транзисторных областей вызывает снижение порогового напряжения [6].

Способы повышения качества процесса формирования мелкощелевой изоляции

Разработка модели технологического процесса формирования мелкощелевой изоляции является важным инструментом при выборе режимов проведения составляющих его технологических операций. Такая модель, адекватно отражая процесс формирования *STI*, дает возможность предсказать величину удаленного разделяющего диоксида и эрозии нитрида для СБИС произвольной топологии, обеспечивая, таким образом, разработчика ключевым инструментом анализа и коррекции топологии [5].

В работах [2, 3, 4] изложены результаты по моделированию операции ХМП для диэлектрических слоев (диоксида кремния), используемых на этапе формирования многоуровневой металлизации. Эта методика моделирования основана на, так называемой, эффективной плотности заполнения, которая является сверткой локальной плотности заполнения и ядра свертки, учитывающего характеристики полирующей подушки. С ее помощью возможен анализ топологии СБИС, необходимый для характеристики процесса формирования межслойной или межметалльной изоляции. Путем коррекции рисунка топологии проектного слоя СБИС возможно добиться значительного снижения разброса толщины диоксида кремния от плотности заполнения [5].

Рассмотрим два основных метода коррекции рисунка топологического слоя, применяемых в *STI*-процессе, использование которых позволяет существенно повысить качество выполнения операции ХМП.

Первый метод основан на введении структур заполнения (*dummy features filling*). В нем пустые области рисунка топологии заполняются электрически нерабочими и несвязанными структурами. Повышая, таким образом, плотность заполнения первоначально пустых областей, их стремятся приблизить по плотности заполнения к остальной части площади кристалла. Как и при формировании многоуровневой металлизации, так и при формировании *STI*, с помощью моделирования операции ХМП возможно добиться оптимального размещения структур заполнения.

Второй метод заключается в травлении по так называемой обратной маске (*reverse etchback*). В этом случае используют второй шаблон с инверсной тональностью по

отношению к шаблону, с помощью которого формируют транзисторные области. Причем размеры топологических фигур на исходном и инверсном шаблонах могут не совпадать. При этом в технологический процесс добавляется дополнительный шаг, который заключается в том, что после осаждения слоя диоксида кремния из газовой фазы формирование защитной маски из фоторезиста проводится с использованием инверсного шаблона. Затем выполняется травление диоксида кремния над островками транзисторных областей. Вертикальный профиль структуры, получающейся до операции ХМП после описанных выше шагов, показан на рисунке 4.

В результате количество диоксида кремния в областях с высокой плотностью размещения транзисторных структур значительно снижается, благодаря чему скорость его удаления по кристаллу во время операции ХМП выравнивается. Этот эффект аналогичен тому, как если бы в этих областях была снижена плотность заполнения (рисунок 5). Следует отметить, что для данного метода проблема наличия остаточного окисла над поверхностью Si_3N_4 устраняется еще до начала операции ХМП. Для этого случая использование моделирования для повышения качества *STI*-процесса будет рассмотрено далее.

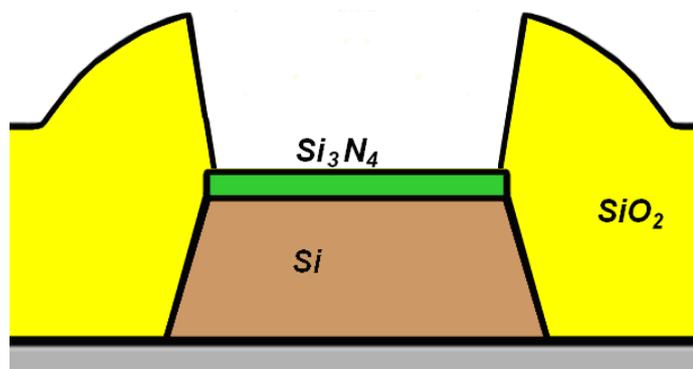


Рис. 4 – Вертикальный профиль структуры перед операцией ХМП при использовании метода травления по обратной маске

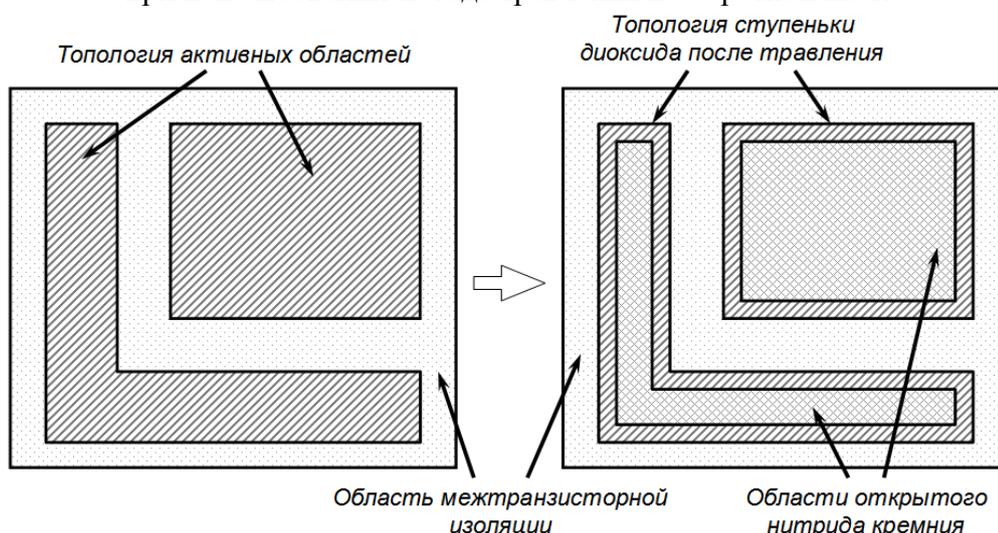


Рис. 5 – Изменение плотности заполнения после травления по обратной маске

В процессе формирования *STI* применение процедуры травления по обратной маске позволяет выровнять количество материала, удаляемого с разных частей кремниевой пластины во время последующей операции ХМП. Однако введение структур заполнения все же оказывается необходимым, поскольку их наличие позволяет создать равномерную плотность заполнения нитрида кремния по всему кристаллу, и, таким образом, избежать проблем с эрозией нитрида и образованием впадин диоксида кремния.

Моделирование операции ХМП в технологии STI

Рассмотрим модель операции ХМП приведенную в работе [5]. Стоит отметить, что такая модель применима только для стандартного STI-процесса (то есть процесса с применением защитного слоя нитрида и без использования технологии травления по обратной маске). Как уже было отмечено выше, в этом случае процесс проведения операции ХМП при формировании мелкощелевой изоляции можно разделить на две фазы. Первая фаза – это удаление «лишнего» диоксида кремния. Вторая фаза – это планаризация нитрида, с одновременным удалением остаточного диоксида кремния над островками транзисторных областей.

Для первой фазы операции ХМП в процессе формирования структуры STI (в этот момент происходит планаризация только одного диэлектрического материала) используется модель, аналогичная предложенной в работе [7], поскольку она была получена автором работы [5] на основе тех же закономерностей, что и модель, описанная в [7]. Использование модели [4] в этом случае также оказывается возможным. Для второй фазы операции ХМП в работе [5], также были предложены модели, позволяющие вычислить скорость планаризации для системы нитрид/диоксид. На основе этих зависимостей в этой работе были получены следующие выражения (в данной статье они приведены без расшифровки параметров) для расчета эрозии нитрида кремния $E(t)$ и величины впадин диоксида кремния после планаризации $D(t)$:

$$D(t) = (h_n - D_{ss}) \cdot e^{-\frac{t-t_n}{\tau_{nit}}} + D_{ss} \quad (1)$$

$$E(t) = K_{ss}(t - t_n) + \frac{(h_n - D_{ss})(1 - \rho_{nit})}{1 + \rho_{nit}(s - 1)} \left(1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau_{nit}}} \right) \quad (2)$$

где t_n – время касания областей нитрида, τ_{nit} – постоянная времени планаризации нитрида, D_{ss} – величина впадин диоксида кремния между островками транзисторных структур для установившегося состояния планаризации, ρ_{nit} – эффективная плотность нитрида кремния, s – селективность планаризации нитрида кремния, K_{ss} – скорость планаризации материала для установившегося состояния, h_n – высота ступеньки нитрида кремния.

Параметры данной модели, как и в случае модели многоуровневой металлизации, получают путем ее калибровки с помощью тестового шаблона.

С использованием приведенных выражений размещение структур заполнения в топологическом слое формирования транзисторных областей может быть оптимизировано. Это позволяет получить гарантированное вскрытие областей нитрида и минимизировать как эрозию нитрида, так и величину впадин диоксида кремния.

Анализ «нестандартного» STI-процесса

В некоторых случаях для производства СБИС используется вариант формирования STI, в котором операция ХМП завершается до достижения защитного слоя (планаризация STI-структуры «на весу»), что дает возможность избежать проблем с эрозией нитрида и планаризацией диоксида кремния в изолирующей канавке. В этом случае допустимо сокращение времени проведения операции ХМП до значения, необходимого для удаления ступеньки. Достижение же необходимой толщины в этом случае осуществляется путем последующего плазмохимического или жидкостного травления. Сокращение времени планаризации позволяет снизить разброс толщины диоксида после завершения операции ХМП.

Формирование же исходной структуры в рассматриваемом процессе происходит с помощью следующих трех дополнительных операций. Первая операция состоит в травлении по обратной маске, в результате которой возникает двойная ступенька окисла перед операцией ХМП. Вторая операция заключается в ХМП структуры, вертикальный профиль которой приведен на рисунке 6. Третья дополнительная операция состоит в травлении слоя диоксида до необходимой толщины. С этой целью применяются процессы плазменного и жидкостного травления диоксида кремния. С их помощью обеспечивается точная подгонка конечной толщины окисла в изоляционной канаве.

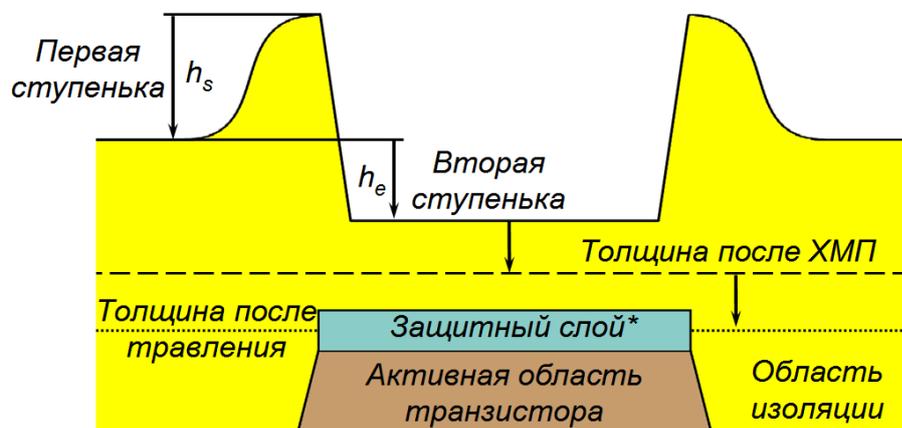


Рис. 6 – Вертикальный разрез структуры активной области перед операцией ХМП (* – в данном случае защитный слой играет роль маски в процессе травления)

Следует обратить внимание, что в данном процессе защитный слой необходим только для обеспечения селективности при травлении. Травление же по обратной маске позволяет уменьшить объем удаляемого перед операцией ХМП материала, что в свою очередь снижает размер конечной ступеньки. Однако если области топологического слоя СБИС имеют различную плотность заполнения, а расстановка структур заполнения в областях с низкой плотностью запрещена правилами проектирования, то после операции ХМП величина разброса толщины окисла в изоляционных канавках может быть все же выше допустимого значения (данная проблема присуща также и стандартной *STI* технологии). В таком случае для ее снижения можно использовать различные варианты локальной модификации метода обратной маски. Это значит, что если обычно при травлении по обратной маске ее получают прямой инверсией топологии транзисторных областей, то с целью повышения их планарности в зонах с низкой плотностью заполнения шаблон обратной маски следует выполнить не путем простой инверсии, а с некоторым сужением (Рис. 7).

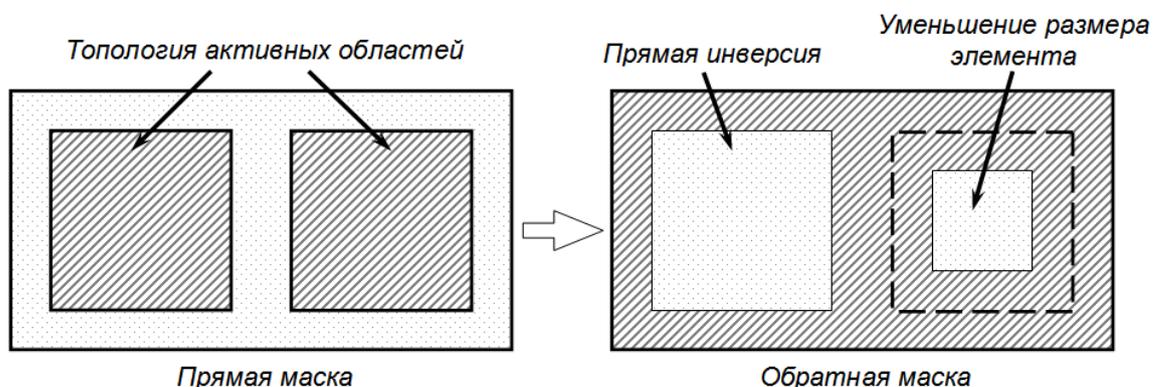


Рис. 7 – Уменьшение размеров элементов на обратной маске для повышения планарности после операции ХМП

Другим вариантом модификации обратной маски является полное или частичное объединение открытых областей на обратной маске (рисунок 8) для той части площади кристалла, где плотность заполнения транзисторными областями достаточно высока. При этом для того, чтобы травление по такой маске не привело к переносу рельефа в донную часть области вскрытия, топология транзисторных областей должна отвечать следующему требованию: расстояние между транзисторными областями, для которых на обратной маске будет проводиться объединение должно быть меньше, чем расстояние, при котором происходит смыкание боковых фронтов осаждаемого диэлектрика (см. рисунок 9). Если данное условие выполняется, то поверхность кристалла в данной области можно считать локально планарной. Это позволяет проводить процесс травления и между транзисторными областями. В этом случае размер области вскрытия в инверсном слое (определяется параметрами операции ХМП) должен быть таковым, чтобы в процессе планаризации не получить чрезмерного удаления окисла.

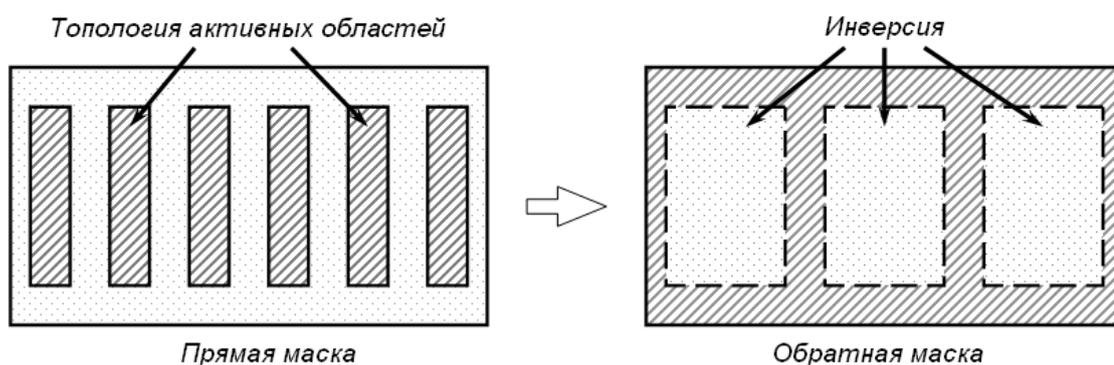


Рис. 8 – Частичное объединение элементов на обратной маске

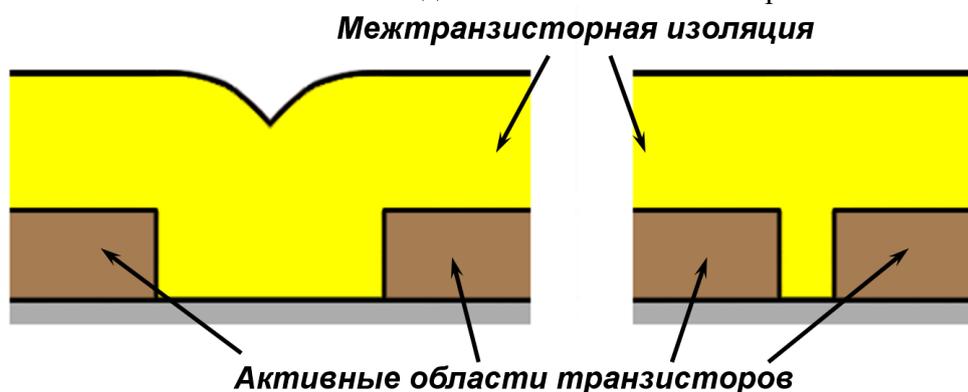


Рис. 9 – Объединение уширения при CVD-процессе

Однако такое изменение размеров элементов на шаблоне обратной маски возможно только с использованием моделирования операции ХМП и требует наличия адекватной модели.

В заключение следует отметить, что для *STI*-процесса с двойной ступенькой в рельефе поверхности кристалла перед операцией ХМП применяемые материалы по сравнению с процессом формирования многоуровневой металлизации остались прежними, однако начальная конфигурация вертикального профиля формируемой структуры изменилась. Из этого следует, что использовать предложенную ранее в [4] полиномиальную модель в данном случае возможно. Однако в связи с изменением начального рельефа поверхности требуется ее доработка, поскольку в случае, когда при планаризации в некоторой области первая ступенька оказывается полностью удаленной, скачком изменяется плотность заполнения и, следовательно, скорость удаления материала.

Заключение

В дальнейшей работе по моделированию операции ХМП необходима модификация ранее разработанной модели применительно к случаю наличия двойной ступеньки в исходной *STI*-структуре. Это даст возможность проводить как оптимизацию размещения структур заполнения, так и оптимизацию размеров элементов обратной маски, что в свою очередь позволит минимизировать разброс толщины остаточного диоксида кремния между островками активных структур в процессе формирования межтранзисторной изоляции.

Литература

1. Гладких А.А. *Алгоритм расчета локальной плотности заполнения топологии субмикронных СБИС для оптимального размещения dummy-структур* – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, Сборник трудов Третьей Всероссийской Школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия», 2010. – стр. 256-267. ISBN 978-5-7038-3453-4
 2. D. O. Ouma, *Modeling of Chemical Mechanical Polishing for Dielectric Planarization*. Dis. PhD in Electrical Engineering and Computer Science / Dennis Okumu Ouma; Massachusetts Institute of Technology – Massachusetts, 1998. – 228 p.
 3. Амирханов А.В., Волков С.И., Гладких А.А., Демин С.В., Родионов И.А., Столяров А.А. Оптимизация плотности заполнения топологии слоев СБИС, направленная на повышение стабильности технологического процесса химико-механической планаризации. – М., НИИСИ РАН, Математическое и компьютерное моделирование систем: теоретические и прикладные аспекты, 2009. – стр. 50-55.
 4. Гладких А.А. Анализ повторяемости и точности моделирования операции химико-механической планаризации слоя двуокиси кремния. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 13-я Молодежная международная научно-техническая конференция «Научное развитие технологий и интеллектуальные системы 2011», 2011. – стр. 324-338
 5. Brian Lee, Ph. D. *Modeling of Chemical Mechanical Polishing for Shallow Trench Isolation*
 6. S. Wolf, *Silicon Processing for the VLSI Era: Vol. 2 - Process Integration*, Lattice Press, Sunset Beach CA, Chapter 13, 1990.
- T. H. Smith. *Device Independent Process Control of Dielectric Chemical Mechanical Polishing*. – Massachusetts Institute of Technology, 1999. – 162 p.