

Неидентичность

В статье приведено решение реальной технической задачи в компании Samsung Electronics.

Владимир Уразаев

urazaev@yandex.ru

Силовые упражнения

Силовая электроника — одна из бурно развивающихся областей электроники в XXI в. Она базируется на использовании полупроводниковых элементов, способных с очень высокой скоростью (до нескольких мегагерц) замыкать и размыкать силовые цепи. Полупроводниковые ключи заменяют собой механические коммутаторы. Они позволяют гибко управлять потоками энергии по любому желаемому алгоритму. Диапазон использования очень широк: начиная со сравнительно небольших по мощности бытовых электроприборов и заканчивая мощными промышленными установками.

Управление полупроводниковыми ключами не требует большой мощности, а ее потери обычно не превышают 1%. Поэтому КПД силовой электроники значительно выше, чем у уходящих в прошлое трансформаторов и механических коммутаторов типа обычных реле. Небольшая мощность управления позволяет создавать силовые интеллектуальные микросхемы, в которых объединены сам ключ, схема управления и схема контроля.

В качестве полупроводниковых ключей могут использоваться биполярные транзисторы, полевые транзисторы (MOSFET), IGBT, тиристоры и др. Самыми распространенными в диапазоне сравнительно небольших коммутируемых токов (до 50 А) являются полевые транзисторы с изолированным затвором — MOSFET. Для них характерны малые статические и динамические потери, крайне небольшие времена переключения и работа на частотах вплоть до 1 МГц. Как следствие, MOSFET практически полностью вытеснили остальные типы силовых полупроводниковых приборов из низковольтных преобразовательных устройств. Совершенствование технологии изготовления MOSFET позволило расширить область их применения. В диапазоне коммутируемых напряжений 600–1000 В и при мощностях до 10 кВт MOSFET уже могут заменить силовые биполярные транзисторы [1]. Совершенствование силовых MOSFET происходит в самых разных направлениях. Об одном из них и пойдет речь в данной статье.

Из плоскости в объем

Планарные (плоскостные) технологии до сих пор составляют основу микроэлектроники. В начале XXI в. специалисты фирмы Intel предсказали возможность изготовления транзисторов с минимальны-

ми размерами элементов 15 нм. По тем временам это была несбыточная мечта. Прошли годы, и эту «сказку» удалось сделать былью: 14-нм технология стала обыденностью в той же Intel [2]. Тогда же был сделан вывод, что дальнейшее уменьшение размеров физически невозможно. Чуть позже решение все же было найдено благодаря переходу из плоскости в трехмерное пространство [3]. Большие мощности и высокий уровень коммутируемых напряжений вносят определенные ограничения в технологические нормы проектирования элементов силовой электроники. Однако микроминиатюризация не оставила в стороне и эту область электроники.

Мощные MOSFET традиционно изготавливались по планарной технологии (рис. 1). Такая структура получалась последовательным нанесением слоев различных материалов на плоскую поверхность кремниевой подложки. На рис. 2 показана современная конструкция MOSFET, изготовленных по Trench-технологии. Это уже не планарная, а трехмерная структура, в которой транзистор формируется в углублении (канавке).

Переход к трехмерной структуре позволил получить более высокую плотность размещения элементов и, следовательно, уменьшить массогабаритные характеристики. В качестве «бонуса» при этом еще и улучшились технические характеристики MOSFET, в частности, снизилось сопротивление открытого канала и уменьшилось значение заряда затвора [4].

Переход «плоскость—объем» не является неожиданным. Это общая линия развития для различных областей техники. Не является неожиданностью и то, что реализация такого очевидного перехода требует решения множества проблем. Об одной из них и пойдет речь далее.

Близнецы или двойняшки?

Сделаем небольшой зигзаг. Близнецами считаются дети, которые одновременно родились от одной беременности у одной и той же матери. Близнецы бывают однояйцевые. Они развивались из одного оплодотворенного яйца. Они однополые и практически идентичные. Разнояйцевые близнецы («двойняшки») развивались из разных яиц. Они могут быть разного пола, у них различные склонности, разные характеры, разные группы крови. То есть «двойняшки» представляют собой абсолютно разные личности.

Если использовать аналогию, то можно сказать, что на полупроводниковой пластине «рождается»

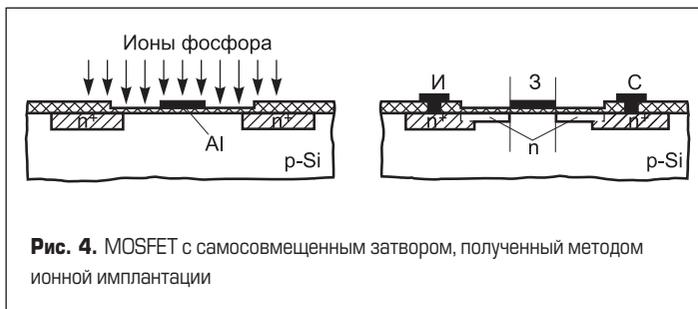


Рис. 4. MOSFET с самосовмещенным затвором, полученный методом ионной имплантации

истока (и) и стока (с) транзистора наносятся не до, а после нанесения слоя затвора (з). Как следствие, появляется возможность использовать затвор в качестве маски для получения истока и стока. Поэтому края слоя затвора и слоев истока и стока будут практически совпадать, а их перекрытие отсутствовать. Существенное уменьшение емкостей перекрытия позволило примерно на порядок (!) повысить быстродействие MOSFET [5].

Не менее полезный и одновременно универсальный кубик — использование жертвенных слоев (sacrificial layer). Они наносятся на поверхность чего-либо, чтобы выполнить временную, чаще всего защитную, функцию. После ее выполнения они удаляются. Если смотреть шире, то любая фотолитографическая маска — тоже жертвенный слой. Жертвенные слои обладают большей функциональностью, чем маска, например, они могут защищать не только горизонтальные, но и вертикальные поверхности.

Есть и другие виртуальные кубики, которые могут использоваться универсально или в частных случаях. Существуют различные техно-

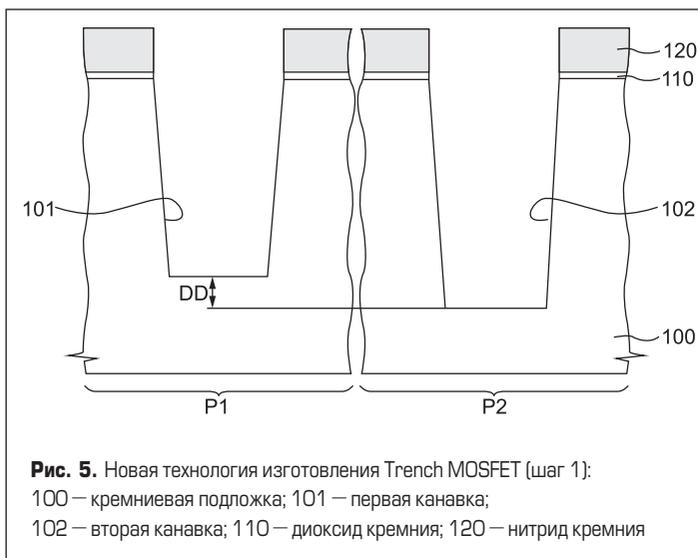


Рис. 5. Новая технология изготовления Trench MOSFET (шаг 1):
100 — кремниевая подложка; 101 — первая канавка;
102 — вторая канавка; 110 — диоксид кремния; 120 — нитрид кремния

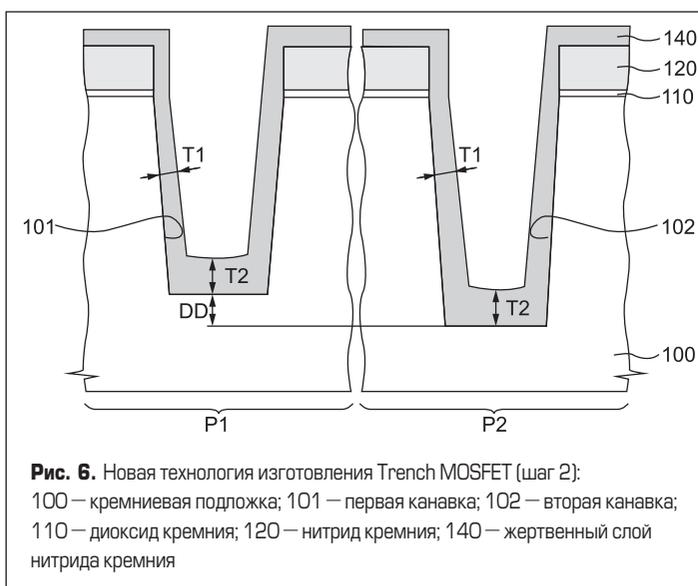


Рис. 6. Новая технология изготовления Trench MOSFET (шаг 2):
100 — кремниевая подложка; 101 — первая канавка; 102 — вторая канавка;
110 — диоксид кремния; 120 — нитрид кремния; 140 — жертвенный слой нитрида кремния

гии заполнения отверстий в кремниевой подложке (PVD, CVD, ALD). Каждый метод имеет свои достоинства и свои недостатки. В зависимости от конкретных требований можно использовать один из них или их сочетание.

То же самое можно сказать и о технологиях формирования отверстий. В зависимости от геометрических параметров отверстий (глубина, ширина, угол наклона стенки и др.) могут быть использованы разные методы травления, начиная с обычного изотропного жидкостного травления и заканчивая различными модификациями плазменного травления.

Очень часто недостатки каких-то методов (технологий) можно использовать с пользой в частных задачах. Например, химическое осаждение (CVD) непригодно для качественного заполнения очень глубоких отверстий из-за возможного образования внутренних пустот. В последние годы появилось много задач, в которых по самым разным причинам зазоры между отдельными элементами микросхемы должны быть заполнены... ничем, то есть пустотой. Использование CVD — прекрасный инструмент для решения такого рода задач.

Чтобы создавать новое, бывает достаточно иметь в своей голове всего лишь набор виртуальных кубиков. После того как желаемая конструкция из таких кубиков будет собрана, можно подключить и узких специалистов, каждый из которых знает все в своей узкой области. Практика показывает, что обратная последовательность действий, как правило, бывает малоэффективной.

Взрослые игры

Чтобы решить поставленную задачу, можно было двигаться в двух принципиально разных направлениях. Можно было последовательно уменьшать разницу по глубине отдельных канавок, стремиться в идеале к нулевому значению. Даже на первый взгляд такое направление казалось малоперспективным. Слишком много внешних факторов влияло на вариации канавок по глубине. В другом направлении неидентичность канавок по глубине принималась как данность, с которой нет смысла бороться. Вопрос ставился так: «Как в разных по глубине канавках получить транзисторы с одинаковой длиной затвора?» В такой формулировке многофакторность задачи исчезает. Поэтому было решено двигаться в этом направлении. Основные стадии показаны на рис. 5–8.

На рис. 5 показаны канавки под будущие транзисторы, сформированные в двух различных местах кремниевой подложки (P1 и P2). Для получения канавок могут быть использованы разные методы, например анизотропное жидкостное травление. Нитрид кремния (120) при этом выполняет функцию маски. Канавки 101 и 102 отличаются по глубине на величину DD (depth difference). В отличие от традиционной технологии (рис. 3) канавки формируются еще до слабого легирования подложки примесями p- или n-типа (в зависимости от типа транзистора). Изменение последовательности было выбрано не случайно. Ведь именно операция слабого легирования кремниевой подложки была одной из причин образования транзисторов с разной длиной затвора.

На следующем этапе проводится осаждение жертвенного слоя нитрида кремния (140) на внутренней поверхности канавок (рис. 6). Могут быть использованы другие материалы с селективностью травления по отношению к подложке (кремнию). Для осаждения используется метод физического осаждения (PVD). Выбор метода также не случаен, поскольку, используя такой метод, можно получить толщину жертвенного слоя на дне канавок (T2) намного больше, чем на боковых стенках (T1). Обратите внимание на то, что толщина жертвенного слоя (T2) одинакова для обеих канавок!

На рис. 7 показано сечение канавок после проведения сразу двух последующих стадий процесса. На первой стадии жертвенный слой нитрида кремния изотропным травлением удаляется с боковых стенок канавок. Жертвенный слой на дне канавок остается, поскольку его толщина изначально была значительно больше, чем на боковых стенках. Более того, толщина остаточного жертвенного слоя остается одинаковой для обеих канавок. На следующей стадии проводится формирование слабо легированных областей 150 (каналов транзистора) на боковых стенках канавок методом ионной имплантации. Жертвенные слои 141 и 142 выполняют при этом функцию маски. Поскольку толщины жертвенных слоев на дне канавок одинаковы, одинаковыми получаются и расстояния от нижней границы легированных областей до дна канавок. $D_1 = D_2$. А ведь именно их различие

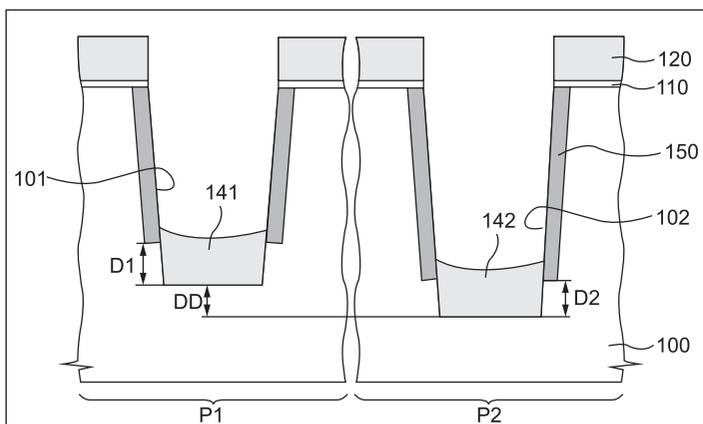


Рис. 7. Новая технология изготовления Trench MOSFET (шаг 3):
 100 – кремниевая подложка; 101 – первая канавка;
 102 – вторая канавка; 110 – диоксид кремния; 120 – нитрид кремния;
 141 – жертвенный слой нитрида кремния на дне первой канавки;
 142 – жертвенный слой нитрида кремния на дне второй канавки;
 150 – легко легированные боковые области канавок

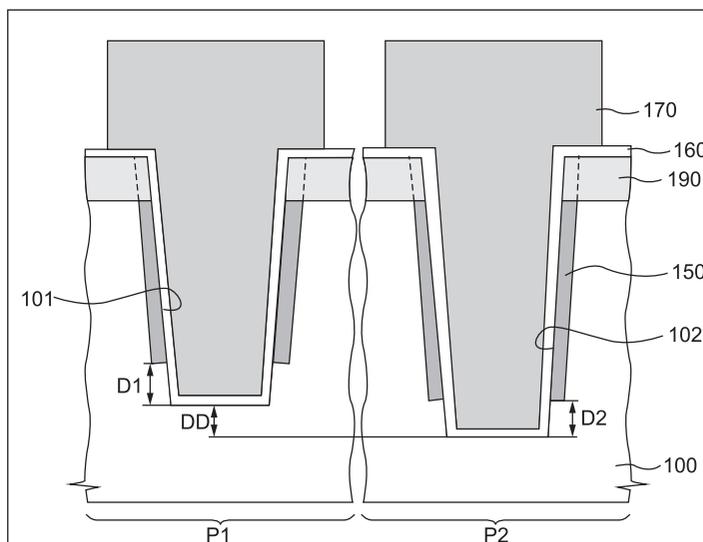


Рис. 8. Новая технология изготовления Trench MOSFET (шаг 4):
 100 – кремниевая подложка; 101 – первая канавка;
 102 – вторая канавка; 110 – диоксид кремния; 120 – нитрид кремния;
 141 – жертвенный слой нитрида кремния на дне первой канавки;
 142 – жертвенный слой нитрида кремния на дне второй канавки;
 150 – легко легированные боковые области канавок; 160 – подзатворный диэлектрик; 170 – электрод затвора; 190 – сильно легированные области

было причиной вариаций длины затвора в MOSFET-транзисторах, изготовленных по обычной технологии.

Последующие стадии технологического процесса не несут ничего нового: они обыденны (рис. 8). Удаляются жертвенные слои 141 и 142 со дна канавок. Для этого используется все то же жидкостное изотропное травление. Подзатворный диэлектрик 160 и электрод затвора 170 формируются внутри канавок. В верхнем слое кремниевой подложки 100 формируются сильно легированные области 190, используя затвор как маску.

Тестирование этого технического решения было завершено с положительными результатами, а само решение защищено патентом [6]. Взрослые игры завершились успешно. Было выбрано удачное сочетание виртуальных кубиков, которые удалось сложить в не менее удачную последовательность.

* * *

Создание новых технологий — сплошь абстрактное мышление. Не раз замечал, что необходимость мыслить абстрактно приводит корейцев в тупик. У них несколько иной стиль мышления. Требуется конкретика. Любимая компьютерная программа корейцев — Power Point. Как задачи, так и их решения обычно преподносятся в виде простых рисунков, выполненных в этой программе. Не исключаю того, что это связано с предпочтениями их американских друзей, для которых комиксы превыше всего. Когда корейцы берут в руки новую книгу, то сначала они ее листают. Не обнаружив в книге рисунков, сразу же теряют к ней интерес. За годы работы в Южной Корее я и сам привык доносить свои мысли в виде серии слайдов, на которых в картинках изображена последовательность действий. Есть у корейцев сложности и с пространственным воображением, хотя конструкторскими 3D-программами они владеют в совершенстве. Интересно, как решалась эта проблема в докомпьютерные времена?

Нам же следует позавидовать их исключительной памяти. Можно ли вслепую набирать текст одновременно на трех языках? Оказывается, можно. Для них это обыденность. Корейские переводчицы строчат как из пулемета сразу на трех языках (корейском, английском и русском)!

Литература

1. www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_543_805.pdf
2. www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/intel-14nm-technology.html
3. Новинки электронной техники. Фирма Intel возвещает эру трехмерных транзисторов. Альтернатива традиционным планарным приборам // Электроника-НТБ. 2002. № 6.

4. www.rlocman.ru/review/article.html?di=59915
5. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.
6. Yongsang Jeong, Vladimir Urazaev, Jin Ha Jeong, Changhun Lee, Semiconductor device including metal-oxide-semiconductor field effect transistors and methods of fabricating the same, US 8927367, 06.01.2015