

Применение субмикронной технологии — путь к созданию высокоэффективных диодов Шоттки

В преобразователях напряжения важная роль отводится диодам Шоттки. Но если транзисторы и микросхемы постоянно находятся в поле зрения разработчиков полупроводниковых приборов, то технологическому и конструктивному развитию диодов не уделяется должного внимания. Ведущие фирмы не занимаются созданием новых версий диодов, считая эти приборы коммерчески невыгодными. Другие фирмы в основном делают косметические доработки, которые не приводят к существенному улучшению параметров диодов Шоттки. Однако без значительного повышения характеристик диодов нельзя говорить об увеличении эффективности в преобразовании энергии. В настоящей статье рассмотрены некоторые аспекты по совершенствованию технологии и конструкции диодов Шоттки. Использование современных достижений в технологии изготовления полупроводниковых приборов позволяет достичь высоких электрических параметров. А это прямой путь к созданию высокоэффективной аппаратуры.

**Николай Голубев,
к. ф.-м. н.
Владимир Токарев,
к. ф.-м. н.
Сергей Шпаковский**

vtokarev@sktbes.vrn.ru

В современных устройствах электропитания выпрямительные блоки выполняются преимущественно с использованием диодов Шоттки. Основное требование к параметрам выпрямительных диодов Шоттки — обеспечение низкого прямого напряжения (VF). Особенно актуальной данная проблема становится в связи с переходом к низковольтному (от 5 к 2 В) питанию больших интегральных схем. Для этих применений желательно иметь выпрямительные диоды с очень низким прямым падением напряжения, высокой скоростью переключения и блокирующей способностью 20–30 В. Вместе с тем постоянно остается предпочтительным уровень предельной температуры перехода (T_{jmax}) выше +125 °С.

В настоящее время при производстве диодов Шоттки самыми распространенными считаются три конструктивно-технологических исполнения. Наиболее важные конструктивно-технологические и электрофизические характеристики разных вариантов исполнения промышленных диодов Шоттки приведены в таблице.

Разрез типовой структуры этих диодов представлен на рис. 1. Барьер Шоттки на таких структурах формируется на планарной поверхности эпитаксиального слоя *n*-типа. По периферии активной области диодной структуры создается замкнутая охран-

ная область *p*-типа проводимости, чтобы исключить концентрацию силовых линий электрического поля по внешней границе барьера Шоттки и защитить структуры от краевого поверхностного пробоя, который при отсутствии охранной области может происходить уже при достаточно малых обратных напряжениях. Величина обратного пробивного напряжения в такой структуре определяется параметрами эпитаксиального слоя (удельное сопротивление ρ , толщина H) и глубиной *p*-области охранного кольца.

Для обеспечения высокого обратного пробивного напряжения и низких обратных токов требуется увеличивать удельное сопротивление и толщину эпитаксиального слоя, что приводит к резкому росту прямого напряжения. В качестве альтернативы приведенной на рис. 1 типовой структуры планарного диода Шоттки может рассматриваться структура, в которой сформировано множество близко расположенных узких канавок с МОП-конденсаторами на боковых стенках и на дне, а барьер Шоттки создается на верхней плоской части мезаструктуры [1]. Новая структура выпрямительного диода в литературе получила название «the Trench MOS Barrier».

Таблица

Характеристики конструкции	Вариант конструкции		
	ORing Process	Standard Process	830 Process
Барьерный металл	Ванадий (V)	Молибден (Mo)	Палладий-молибден (Pd-Mo)
Предельная температура перехода / корпуса (T_j/T_C), °С	125/100	150/125	175/150
Прямое напряжение диода, В	$V_{FM} = 0,25$ (@ 100 °С)	$V_{FM} = 0,46$ (@ 125 °С)	$V_{FM} = 0,54$ (@ 125 °С)
Обратный ток диода, mA	$I_{RM} = 855$ (@ 100 °С)	$I_{RM} = 148$ (@ 125 °С)	$I_{RM} = 26$ (@ 125 °С)

Примечание. Параметры V_{FM} и I_{RM} приведены для диодов с одинаковой площадью кристалла, изготовленных на эпитаксиальных структурах с удельным сопротивлением $\rho = 0,2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$

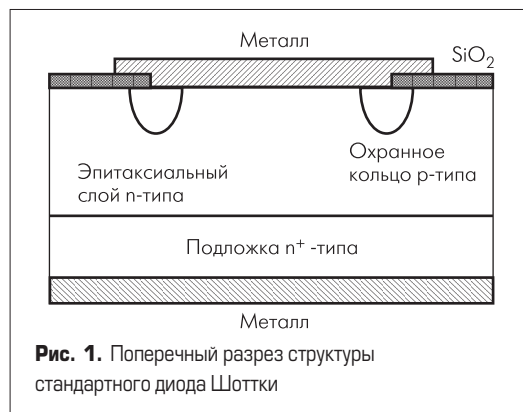
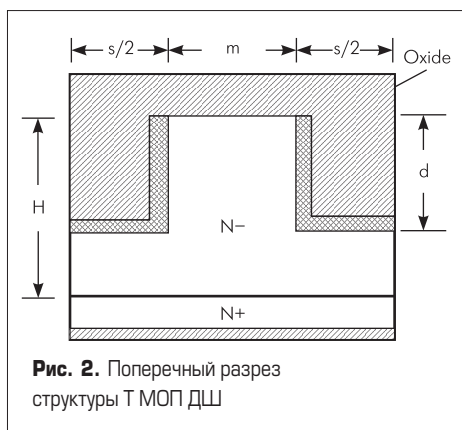


Рис. 1. Поперечный разрез структуры стандартного диода Шоттки



Schottky (TMBS) Rectifier» — тренч МОП-диод с барьером Шоттки (ТМОП ДШ).

Поперечный разрез структуры выпрямительного ТМОП ДШ представлен на рис. 2. В этом приборе МОП-структура формируется в основании и на боковых стенках канавки, в то время как верхняя поверхность используется для формирования барьера Шоттки. Заполняющий канавку электрод может быть металлом или поликремнием, он закорачивается с электродом барьера Шоттки.

Теоретическое обоснование концепции выпрямительных ТМОП ДШ приведено в работе [1]. Характеристики прямого проводящего состояния и обратные блокирующие характеристики были получены путем использования структуры прибора, показанной на рис. 2. Чтобы изучить влияние физических параметров на характеристики прибора, изменялись следующие параметры: глубина канавки d , ширина мезы s , толщина оксида канавки и уровень легирования эпитаксиального слоя. В процессе вычислений для области дрейфа использовано время жизни основных носителей заряда, равное 1 мкс. Толщина эпитаксиального слоя между основанием канавки и подложкой была выбрана такой, чтобы исключить смыкание обедненных слоев при обратных смещениях.

Для понимания того, как влияет МОП-область канавки на характеристики обратного смещения, необходимо исследовать распределение электрического поля в ТМОП ДШ при обратных смещениях, близких к пробое. Профиль электрического поля вдоль вертикальных линий, проходящих через область Шоттки посередине кремниевой мезаструктуры, показан на рис. 3.

Для сравнения также показан профиль электрического поля в случае стандартного диода Шоттки с концентрацией легирующей примеси в области дрейфа $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Здесь электрическое поле имеет обычную треугольную форму. Для структуры ТМОП ДШ отрицательный потенциал электрода МОП-конденсатора канавки индуцирует области обеднения в полупроводнике, примыкающим к вертикальным стенкам и основанию канавок, что приводит к существенному изменению профиля распределения поля под барьером Шоттки в мезаструктуре. Существует два отличающихся эффекта: первый — электрическое поле на поверхности в зоне барьера Шоттки сильно уменьшается, второй — пик электрического поля смещается

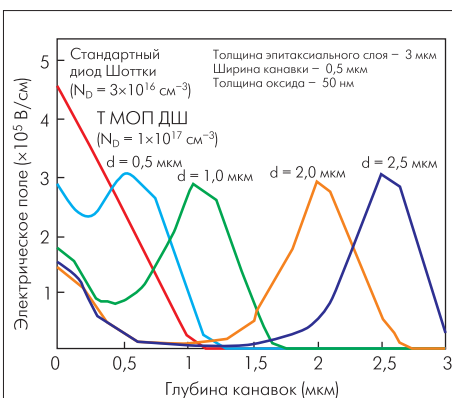


Рис. 3. Профиль электрического поля вдоль вертикальной линии, проходящей через барьер Шоттки для стандартного диода и ТМОП ДШ с различными глубинами канавок. Уровень легирования: $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для стандартного диода Шоттки и $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для ТМОП ДШ

от поверхности во внутреннюю область полупроводника. Уменьшенное электрическое поле на поверхности в зоне барьера Шоттки вызывает экспоненциальное уменьшение обратных токов утечек, поскольку снижение высоты барьера Шоттки исключено. Так как пик электрического поля смещен от поверхности, мезаструктура способна блокировать большее напряжение, чем плоскопараллельная протяженная структура. Величина напряженности электрического поля в области максимума в структуре ТМОП ДШ намного ниже поверхностного поля плоскопараллельного стандартного диода Шоттки.

Даже для глубины канавки 0,5 мкм уменьшение электрического поля на границе является значительным, и этот эффект усиливается с увеличением глубины канавки, однако он ограничен напряженностью электрического поля вокруг острых углов в основании канавок. Пик электрического поля возникает на углах канавки, что ограничивает улучшение напряжения пробоя выше оптимальной глубины канавки. Следовательно, напряжение пробоя первоначально быстро возрастает с глубиной канавки, как показано на рис. 4, но не улучшается после глубины канавки = 1 мкм. Так как увеличение глубины канавки вызывает повышение последовательного сопро-

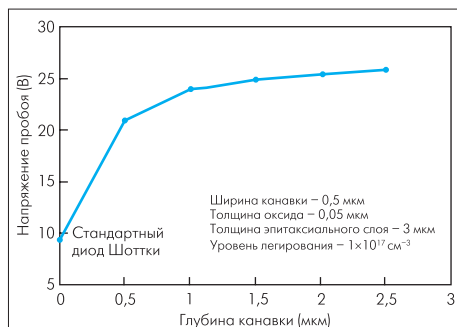
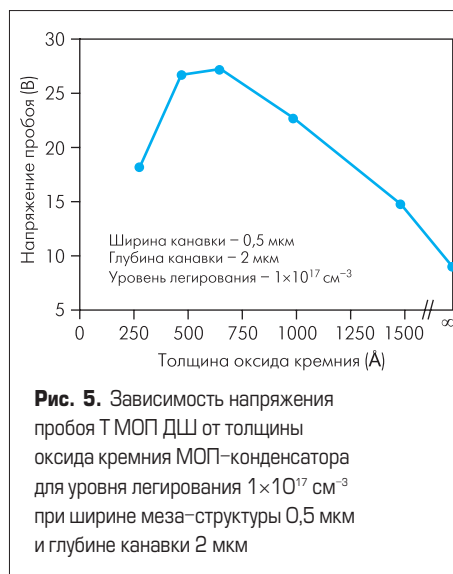


Рис. 4. Зависимость напряжения пробоя ТМОП ДШ от глубины канавки. Уровень легирования — $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина эпитаксиального слоя — $H = 3 \text{ мкм}$, ширина канавки — 0,5 мкм, толщина оксида — 0,05 мкм



тивления, представленного сопротивлением дрейфа, это противоположным образом влияет на прямое напряжение диода.

Другим критическим параметром, непосредственно управляющим зарядовой связью между электродом МОП-конденсатора канавки и объемом полупроводника в мезаструктуре, является толщина оксида. Меньшая толщина оксида приводит к образованию обедненного слоя уже при достаточно низком напряжении. Однако необходимо обеспечить пробивное напряжение оксида не ниже максимального обратного напряжения диода. Поэтому было изучено влияние толщины оксида на способность обратного блокирования. На рис. 5 приведена полученная из результатов моделирования зависимость пробивного напряжения ТМОП ДШ от толщины оксида кремния. Расчеты показали, что для заданного уровня легирования эпитаксиального слоя $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при ширине мезаструктуры 0,5 мкм и глубине канавки 2 мкм оптимальная толщина оксида составляет 0,05–0,07 мкм.

Чтобы установить влияние ширины области с барьером Шоттки (ширины мезаструктуры) на величину обратного пробивного напряжения, проводились расчеты распределения электрического поля в структурах с расстояниями между канавками от 0,1 мкм до ∞ . Расчеты показали, что очень тонкая мезаструктура имеет низкое напряжение пробоя. Это происходит из-за пробоя вблизи основания канавки, где наблюдается максимальная напряженность электрического поля. При большой ширине мезаструктуры области обеднения противоположных боковых стенок не перекрываются, и напряжение пробоя приближается к случаю плоскопараллельного диода Шоттки. Для уровня легирования эпитаксиального слоя $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщины оксида 0,05 мкм и глубины канавки 2 мкм моделирование показало оптимальную ширину мезаструктуры $\approx 0,5 \text{ мкм}$, как представлено на рис. 6.

Таким образом, математическое моделирование ячейки ТМОП ДШ продемонстрировало, что напряжения пробоя 25 В можно достичь при уровне легирования эпитаксиального слоя $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Это в 3 раза больше,



Рис. 6. Зависимость напряжения пробоя Т МОП ДШ от ширины меза-структуры для уровня легирования $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при глубине канавки 2 мкм

чем напряжение резкого плоскопараллельного $p^+ - n$ -перехода для такого уровня легирования.

Для подтверждения результатов математического моделирования были изготовлены экспериментальные образцы приборов. Чтобы упростить технологию изготовления, применялся самосовмещенный процесс окисления с двумя фотолитографиями. В качестве базовой выбрана конструкция со следующими геометрическими параметрами: глубина канавки 0,5 мкм, ширина мезаструктуры 0,5 мкм и толщина оксида в канавке 0,05 мкм. Эпитаксиальный слой толщиной 3 мкм с концентрацией основных носителей $(0,8 - 1,2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ выращивался на подложке N^+ -типа ориентации $\langle 100 \rangle$ с удельным сопротивлением 0,004 Ом·см. Маска для травления канавок и самосовмещенного окисления создавалась выращиванием термического оксида кремния толщиной 0,02 мкм с последующим осаждением нитрида кремния толщиной 0,06 мкм и низкотемпературного оксида кремния толщиной 0,3 мкм. Фотолитографическим методом формировался рисунок канавок, и удалялись защитные слои с последующим травлением канавок в кремнии. Оставшийся в зазоре между канавками слой нитрида кремния делает возможным самосовмещенное окисление стенок и основания канавок. После удаления маски нитрида кремния открывается верхняя плоская часть мезаструктуры, на которой формируется барьер Шоттки напылением Ti. Омический контакт на обратной стороне создан напылением металлизации Ti-Ni-Ag. Такой маршрут позволяет изготавливать кристаллы диодов Шоттки с использованием двух фотолитографий.

Прямые и обратные вольтамперные характеристики (ВАХ) изготовленных по описанному выше маршруту Т МОП ДШ и аналогичных по площади и используемым материалам стандартных плоскопараллельных диодов Шоттки приведены на рис. 7 и 8.

Благодаря высокому легированию эпитаксиального слоя прямое напряжение V_F при плотности тока 100 А/см^2 имеет значение $\approx 0,23 \text{ В}$. При одинаковой площади кристалла, по понятным причинам, для стандартного диода Шоттки V_F должно быть несколько ниже, чем для Т МОП ДШ. Однако, как видно из рис. 8, для Т МОП ДШ обратное пробив-

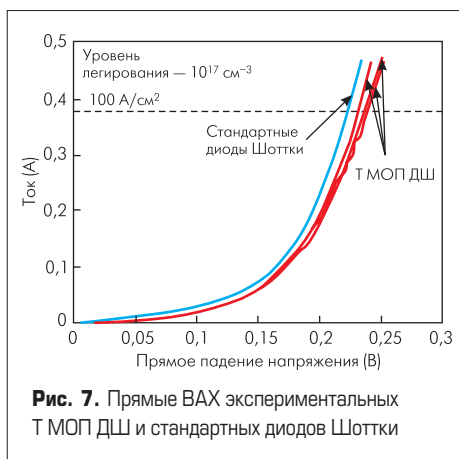


Рис. 7. Прямые ВАХ экспериментальных Т МОП ДШ и стандартных диодов Шоттки

ное напряжение имеет значение $\approx 15 - 17 \text{ В}$, тогда как по стандартной технологии при выбранном уровне легирования эпитаксиального слоя невозможно получить диоды, обеспечивающие блокирование напряжения при обратном включении.

Меньшая величина экспериментально полученного напряжения пробоя по сравнению с моделированием, вероятно, возникла из-за неполного заполнения боковых стенок канавок металлом, как наблюдалось на поперечном сечении микрофотографии, полученной с помощью сканирующего электронного микроскопа. Эта проблема возникает из-за очень узких канавок с большим отношением сторон и может быть решена с помощью улучшения методики конформного осаждения металла, такой как нагревание подложки в процессе осаждения металла.

Промышленный выпуск высокоэффективных диодов Шоттки по новой технологии освоила компания International Rectifier. Прибор изготавливается в корпусе TO247 под наименованием 80СРТ015. В процессе разработки и освоения массового производства компания провела оптимизацию конструкции [2]. В результате проведенных работ были определены основные требования к конструкции:

1. Для уменьшения прямого напряжения диода и поддержания низких обратных токов предпочтительна комбинация низкобарьерного металла, малой ширины мезаструктуры ($\approx 0,5 \text{ мкм}$), тонкого оксида кремния ($\approx 0,05 \text{ мкм}$) и сопротивления эпитаксиального слоя $\geq 0,2 \text{ Ом·см}$.
 2. Обратное пробивное напряжение управляется с помощью параметра De, который определяется как расстояние между основанием канавки и границей раздела «эпитаксиальный слой — подложка».
 3. Снизить прямое напряжение диода, поддерживать необходимое напряжение пробоя и не увеличить токи утечки можно, выбрав глубину канавки от 1,5 до 2,0 мкм.
- Результаты исследования характеристик нового прибора в сравнении с параметрами стандартного прибора 65PQ015 опубликованы в работе [2]. Сравнимые приборы имеют одинаковую площадь кристалла и корпусируются по идентичной технологии.

Вольтамперные характеристики приборов 80СРТ015 и 65PQ015 приведены на рис. 9.

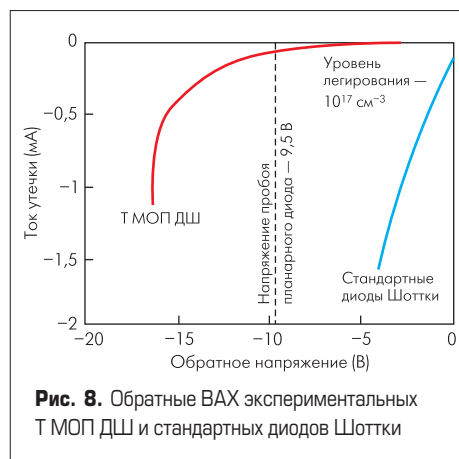


Рис. 8. Обратные ВАХ экспериментальных Т МОП ДШ и стандартных диодов Шоттки

При прямом токе $I_F = 40 \text{ А}$ и $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ на приборах 80СРТ015 прямое напряжение на 36 мВ ниже, чем на 65PQ015. Токи утечек при $V_R = 15 \text{ В}$ и $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ для Т МОП ДШ в 4 раза ниже, чем для стандартного диода Шоттки. Подобное снижение наблюдается и при повышенной температуре, что позволяет использовать приборы 80СРТ015 при $T_J = 125 \text{ }^\circ\text{C}$.

В импульсных источниках питания, где диод Шоттки используется как выходной выпрямитель, прибор может подвергаться кратковременным перегрузкам по обратному напряжению в случае аварийных ситуаций или промышленных помех. В таких условиях к диоду Шоттки предъявляются требования по устойчивости к лавинному пробую, которая характеризует способность прибора поглощать энергию в режиме лавинного пробоя. На рис. 10 сравнивается способность поглощения энергии в широком интервале индуктивных нагрузок. Прибор 80СРТ015 способен рассеивать без разрушения вдвое большую энергию, чем планарный прибор. Это можно объяснить с помощью различного распределения электрического поля при пробое, как наблюдалось при моделировании прибора. В то время как

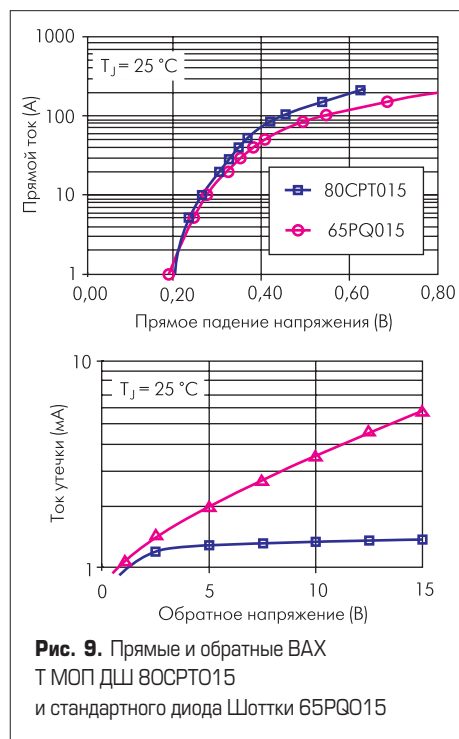


Рис. 9. Прямые и обратные ВАХ Т МОП ДШ 80СРТ015 и стандартного диода Шоттки 65PQ015

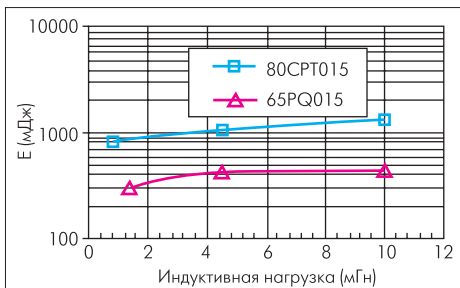


Рис. 10. Энергетические характеристики ТМОП ДШ 80СРТ015 и стандартного диода Шоттки 65PQ015 в режиме лавинного пробоя

в обычном планарном приборе напряженность электрического поля накапливается в ограниченной области около края P⁺ охран-

ного кольца, в ТМОП ДШ максимальная напряженность электрического поля локализуется вблизи основания канавки каждой индивидуальной ячейки. Следовательно, вся активная область рассеивает лавинную энергию и полная поглощающая способность увеличивается.

Заключение

1. Применение субмикронной тренч-технологии позволило компании International Rectifier освоить производство низковольтных высокоэффективных диодов Шоттки 80СРТ015 с существенно улучшенными характеристиками по сравнению со стандартными планарными приборами 65PQ015.

2. Новый прибор обеспечивает снижение прямого напряжения на 40 мВ и уменьшение в 4 раза обратного тока утечки по сравнению эталонным планарным прибором с таким же пробивным напряжением и прямым током.
3. Достигнуто двукратное увеличение устойчивости к лавинному пробоя.
4. Максимальная температура перехода увеличивается от 100 до 125 °С.

Литература

1. Mehrotra M., Baliga B. J. Solid-State Electronics. Vol. 38, 1995. N. 4. P 801–806.
2. Chiola D., Oliver S., Soldano M. International Rectifier. As presented at PCIM Europe. 2002.