

УДК 621.382.2/3, 004.942

## КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИОДОВ ШОТТКИ С МОП КАНАВОЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

В.С. КОТОВ, Н.Ф. ГОЛУБЕВ, В.Е. БОРИСЕНКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 22 марта 2013

Проведено 2D-моделирование и экспериментальное исследование усовершенствованной конструкции и технологии изготовления диодов Шоттки с металл-окисел-полупроводник (МОП) канавочной структурой на кремнии, позволивших упростить технологический процесс на одну фотолитографию и улучшить параметры диодов.

*Ключевые слова:* диод, проектирование, технология, МОП структура, пробивное напряжение, ток утечки.

### Введение

Наиболее распространенные кремниевые диоды Шоттки имеют планарную структуру. Барьер Шоттки в такой структуре (рис.1, а) окружен замкнутым  $p^+$ -охранным кольцом и сформирован на  $n^-$ -эпитаксиальном слое с достаточно высоким удельным сопротивлением, обеспечивающим требуемое пробивное напряжение. Известно, что такие диоды Шоттки имеют высокие значения обратного тока, особенно при повышенной рабочей температуре. Причинами этого недостатка диодов Шоттки являются как их конструктивные особенности, так и структурные дефекты в выпрямляющем контакте металл / кремний, которые образуются при проведении высокотемпературных технологических операций в процессе их изготовления.

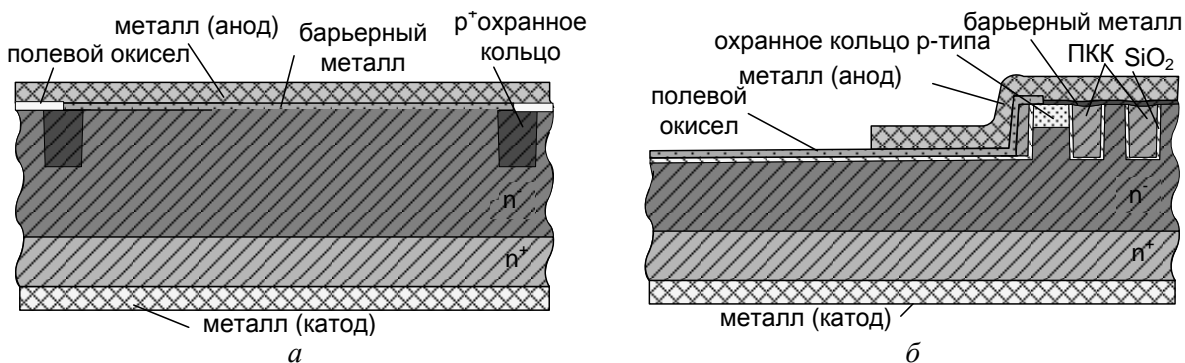


Рис. 1. Конструкция планарного диода Шоттки (а) и ТМБС диода (б) [2]

Современное поколение диодов Шоттки с МОП канавочной структурой, изготовленных в виде рельефных структур, состоящих из множества узких полос барьеров Шоттки субмикронных размеров, разделенных канавками с затворами из поликристаллического кремния на вертикальных боковых стенках (ТМБС диоды – Trench MOS barrier Schottky diode), позволяет получить как низкое значение прямого падения напряжения  $V_F$  и высокую скорость переключения, так и низкие токи утечки  $I_R$  при обратном смещении [1, 2]. Барьер Шоттки в такой структуре создается на горизонтальной поверхности части эпитаксиального слоя между канавками, в которых на боковых стенках сформированы МОП структуры с поликремниевым или металлическим электродом, расположенным внутри канавки и соединенным с анодом

диода (рис.1, б). Такой прибор состоит из множества соединенных параллельно диодов Шоттки, каждый из которых ограничен канавкой с МОП структурой на боковой стенке. Такая конструкция имеет ряд преимуществ по сравнению с планарной структурой:

– при обратном смещении вдоль боковых стенок канавок образуются области пространственного заряда (ОПЗ), в которых электрическое поле ориентировано перпендикулярно направлению протекания тока, что приводит к снижению значений обратного тока;

– при положительном потенциале на аноде в МОП структуре вдоль боковых стенок канавок возникает обогащенный носителями заряда слой, что наряду с большей концентрацией донорной примеси у границы раздела оксид кремния / полупроводник, вследствие сегрегации примеси, позволяет получать меньшее прямое падение напряжения, чем у планарных структур, несмотря на то, что активная площадь контакта Шоттки в таких структурах меньше, чем в планарных диодах [1].

Выигрыш в прямом падении напряжения для TMBS диодов стал возможен благодаря использованию малых проектных норм, позволяющих получить больший периметр боковых стенок канавок [3]. Конструкция диода проектируется таким образом, что минимальная проектная норма обычно реализуется в ширине канавки, а расстояние между канавками должно обеспечивать минимальное значение прямого падения напряжения для выбранного рабочего напряжения диода. Это приводит к тому, что, с одной стороны, при меньшем расстоянии между канавками сопротивление узкой области кремния в направлении протекания тока увеличивается настолько, что падение напряжения на этом сопротивлении становится существенным и, тем самым, приводит к увеличению прямого падения напряжения; а с другой стороны, при большем расстоянии между канавками периметр их боковых стенок уменьшается, что также приводит к увеличению прямого падения напряжения.

На практике для изготовления TMBS диодов используется оборудование, позволяющее реализовать на пластине кремния проектные нормы 0,6 мкм и ниже, что автоматически означает увеличение себестоимости производства таких диодов.

Целью данной работы является разработка конструкции охранной области TMBS диодов, позволяющей упростить технологический процесс их изготовления и, тем самым, снизить себестоимость диодов Шоттки с МОП канавочной структурой.

### **Усовершенствованная конструкция диодов Шоттки с МОП канавочной структурой**

Анализ известной конструкции TMBS диодов [2] показал, что технологический процесс их производства можно упростить за счет уменьшения числа фотолитографий. В таких диодах на периферии формируется охранная область  $p$ -типа проводимости (рис. 1, б), для чего требуется выполнять специальную фотолитографию, ионное легирование акцепторной примесью и блок высокотемпературных операций. В этой конструкции охранная область  $p$ -типа проводимости также, как и  $p^+$ -охранное кольцо в планарных диодах Шоттки (рис. 1) создается с целью исключения краевых эффектов и повышения пробивного напряжения.

С целью подтверждения предположений о возможности оптимизации конструкции TMBS диодов проведено численное моделирование структуры прибора с рабочим напряжением до 100 В и током до 10 А с разными конфигурациями конструктивных элементов охранной области и определено распределение электрического поля в ней. В числе прочих были исследованы структуры охранных областей, изображенные на рис. 2, с одной и двумя канавками охранных колец в сравнении со структурой рис. 1, б [2] и структурой без канавки охрannого кольца, в которой в отличие от структуры рис. 2 в охранной области расположена только полевая обкладка, а охранные кольца отсутствуют.

В результате расчетов с использованием пакета технологического моделирования TCAD Synopsys выявлены и оптимизированы наиболее критичные области в конструкции прибора, в которых напряженность электрического поля достигает значений, при которых происходит лавинный пробой. Установлено, что максимальные значения пробивного напряжения достигаются в структурах, активная область которых ограничена одной или несколькими замкнутыми канавками (охранными кольцами), защищенными полевым окислом (рис. 2). Полевая обкладка, роль которой играет металлическая контактная площадка анода,

должна быть расширена за пределы области охранных колец на расстояние, превышающее ширину ОПЗ при напряжении пробоя прибора. Канавки охранных колец конструктивно подобны внутренним канавкам активной области, но отличаются по ширине – в 4–5 раз больше ширины канавок активной области.

Предлагаемая конструкция TMBS диодов позволяет исключить блок операций формирования охранной области *p*-типа проводимости вследствие того, что TMBS диод можно рассматривать как множество соединенных параллельно диодов Шоттки, каждый из которых ограничен канавкой с МОП структурой на боковой стенке. Такой отдельный диод Шоттки конструктивно подобен классическому диоду с мезаструктурой, в котором отсутствуют краевые эффекты. МОП структура на боковых стенках канавок «растягивает» ОПЗ внутрь эпитаксиального слоя, что позволяет получить требуемое пробивное напряжение без создания охранных областей *p*-типа проводимости. Периферийная замкнутая канавка охранного кольца аналогична по структуре канавкам активной области и создается в едином технологическом процессе с ними.

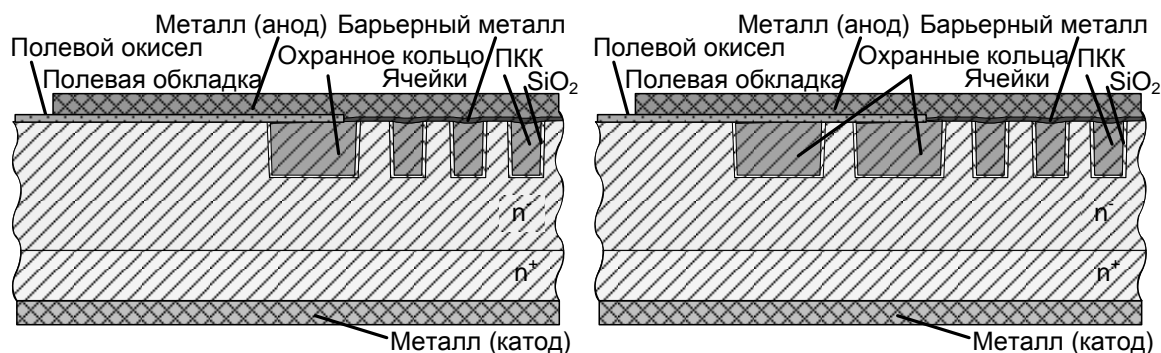


Рис. 2. Поперечное сечение ячеек и охранной области диода Шоттки с МОП канавочной структурой с одним охранным кольцом (слева) и двумя кольцами (справа)

### Результаты и их обсуждение

Найденное конструктивное решение: широкая канавка охранной области и металлическая полевая обкладка, – обеспечивает надежную изоляцию активной области от периферии кристалла без использования охранных областей *p*-типа проводимости. При обратном смещении ОПЗ в такой структуре расширяется за пределы активной области, что позволяет достичь требуемого пробивного напряжения (рис. 3).

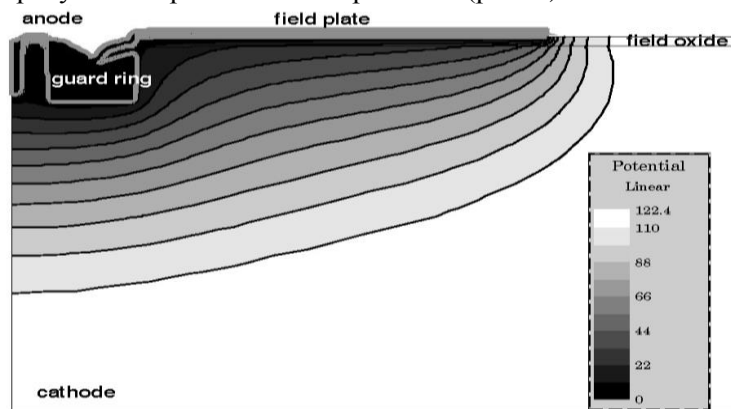


Рис. 3. Распределение потенциала в усовершенствованной конструкции TMBS диода

В результате моделирования установлено, что использование двух и более дополнительных канавок охранных колец не приводит к увеличению значения пробивного напряжения, а для структуры TMBS диода без канавки охранного кольца ток утечки при обратном напряжении смещения 100 В на 28–31 % больше. Результаты численного моделирования пробивного напряжения и тока утечки TMBS диодов различных конструкций

представлены в таблице, из которой следует, что конструкция [2] имеет пробивное напряжение диода меньше на 4–5 В, чем предложенная усовершенствованная конструкция.

Таблица 1. Расчетные значения пробивного напряжения  $V_R$  и тока утечки  $I_R$  для разных конструктивных исполнений ТМБС диодов

| Варианты конструкций           | Конструкция [2] | Конструкция без канавки охр.кольца | Усовершенствованная конструкция с одной канавкой охр.кольца | Усовершенствованная конструкция с двумя канавками охр.колец |
|--------------------------------|-----------------|------------------------------------|---|---|
| $V_R$ при $I_R=5\text{мА}$ , В | 117             | 121                                | 121,5   | 121,5   |
| $I_R$ при $V_R=100$ В, мкА     | 240             | 312                                | 243   | 240   |

Экспериментальные исследования усовершенствованной конструкции проводилось на ТМБС диодах с рабочим напряжением до 100 В и током до 10 А, изготовленных на пластинах монокристаллического кремния диаметром 150 мм с эпитаксиальным слоем толщиной 9,0 мкм и удельным сопротивлением 2,5 Ом×см, выращенным на подложке с удельным сопротивлением (0,002 – 0,007) Ом×см и ориентацией (100). Использовалась 0,35 мкм технологическая линейка, так как минимальная ширина канавки составляла 0,4 мкм. Результаты измерений параметров изготовленных экспериментальных образцов приборов разных конструктивных исполнений приведены в табл. 2. ВАХ ТМБС диода с одной канавкой охранного кольца показана на рис. 4.

Полученные экспериментальные результаты показывают хорошую сходимость с результатами расчетов. На всех исследованных конструктивных вариантах ТМБС диодов пробивное напряжение практически не отличается, однако конструкция без канавки охранного кольца имеет больший ток утечки, а конструкция с двумя канавками охранных колец занимает большую площадь по сравнению с конструкцией с одной канавкой охранного кольца.

Таблица 2. Типовые значения пробивного напряжения  $V_R$  и тока утечки  $I_R$  экспериментальных ТМБС диодов различных конструкций

| Варианты конструкций           | Конструкция без канавки охр.кольца | Усовершенствованная конструкция с одной канавкой охр.кольца | Усовершенствованная конструкция с двумя канавками охр.колец |
|--------------------------------|------------------------------------|---|---|
| $V_R$ при $I_R=5\text{мА}$ , В | 118–120                            | 119–122   | 119–123   |
| $I_R$ при $V_R=100$ В, мкА     | 360–375                            | 280–292   | 275–284   |

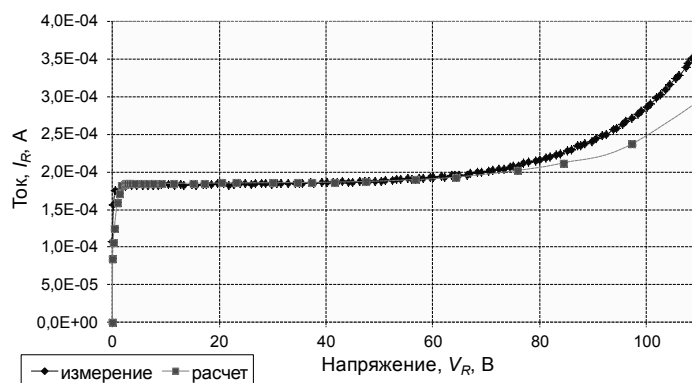


Рис. 4. Вид ВАХ тока утечки усовершенствованной конструкции ТМБС диода с одной канавкой охранного кольца

### Заключение

Усовершенствование конструкции области охранных колец диодов Шоттки с МОП канавочной структурой позволяет упростить известный технологический процесс за счет исключения одной фотолитографии и блока высокотемпературных операций, необходимых для создания диффузионного охранного кольца. При этом пробивное напряжение увеличивается на 4–5 В, а ток утечки диода практически не изменяется. Получено хорошее соответствие экспериментальных данных с результатами расчетов.

# STRUCTURE AND TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS OF TMBS DIODES

V.S. KOTOV, N.F. GOLUBEV, V.E. BORISENKO

## Abstract

An improved structure and technological process of trench MOS barrier Schottky (TMBS) diodes are developed and studied by 2D-simulation. The experiments performed demonstrated simplification of the technology by elimination of one photolithography and improvement of the diode parameters.

## Список литературы

1. *Max Chen, Henry Kuo, Sweetman Kim* // Power Electronics Technology. 2006. P.22–32.
2. *Davide Chiola, Marina del Rey*. Recessed termination for trench Schottky device without junction curvature / Патент США №7466005 B2
3. *Н. Голубев, В. Токарев, С. Шпаковский* // Силовая электроника. 2005. №3. С. 30–33