

УДК 681.32

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ЛАВИННОМУ ПРОБОЮ МОЩНЫХ КРЕМНИЕВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ С КАНАВОЧНЫМ ЗАТВОРОМ

В.С. КОТОВ, В.В. ТОКАРЕВ, В.Е. БОРИСЕНКО

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

Поступила в редакцию 1 ноября 2010

Проведены расчеты и экспериментально исследована возможность увеличения устойчивости к лавинному пробую мощных кремниевых металл/окисел/полупроводник (МОП) транзисторов с канавочным затвором за счет обеспечения более низкого пробивного напряжения охранного кольца по сравнению с пробивным напряжением ячейки и создания равномерного по площади кольца контакта к нему. Энергия лавинного пробоя в таких приборах может быть увеличена на порядок.

*Ключевые слова:* микроэлектроника, проектирование, технология, прибор, *trench-mosfet*, канавочный затвор, энергия лавинного пробоя.

### Введение

В настоящее время мощные кремниевые МОП-транзисторы являются одними из самых востребованных силовых полупроводниковых приборов. Область их применения очень широкая: в преобразователях постоянного и переменного тока и блоках питания на их основе, в системах управления электродвигателями, в электронных балластах, в схемах управления кондиционеров, холодильников, стиральных машин, пылесосов и других бытовых и промышленных приборов. При этом актуальными задачами повышения эффективности использования мощных транзисторов являются: снижения электрического сопротивления транзисторов в открытом состоянии, защита их от воздействия высоких напряжений и электростатических зарядов, уменьшение размеров для соответствующего снижения стоимости этих приборов. Для решения этих задач наиболее перспективно использование канавочной конструкции затворов, так называемых *trench*-затворов [1]. В них затвор выполняется в виде канавки в кремнии с выращенным в ней подзатворным диэлектриком и заполненной затем поликристаллическим кремнием, легированным в процессе осаждения примесью, создающей в нем *n*+тип проводимости – рис. 1.

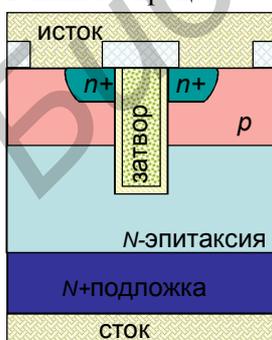


Рис. 1. Типовая структура *trench*-ячейки МОП-транзистора.

Однако, транзисторы с канавочным затвором пока уступают по величине энергии лавинного пробоя транзисторам с традиционной планарной конструкцией [2].

Нами выполнены разработка и экспериментальное опробование конструктивного решения, позволяющего увеличить устойчивость мощных кремниевых МОП-транзисторов с канавочным затвором к лавинному пробую. Предлагается использовать специальную конструкцию нулевого охранного кольца, а именно:

- минимальная ширина кольца должна быть не менее трех ее глубин для обеспечения его большей глубины по сравнению с глубиной *p*-области в *trench*-ячейке за счет размерного эффекта при диффузии примеси;
- должен быть обеспечен равномерный контакт к кольцу.

Данный подход эффективен для транзисторов с рабочим напряжением 40 В и выше, когда традиционные методы по обеспечению устойчивости к лавинному пробую неэффективны. Результаты представлены в данной статье.

### Конструкция МОП-транзистора с канавочным затвором с улучшенной устойчивостью к лавинному пробую

Одной из важных проблем при переходе с планарной на канавочную технологию стало обеспечение устойчивости транзистора к лавинному пробую, которая характеризуется энергией одноимпульсного лавинного пробоя  $E_{AS}$  (*Single Pulse Avalanche Energy*). Чем большую энергию лавинного пробоя может выдержать транзистор, тем надежнее он работает с большой индуктивной нагрузкой.

В планарном транзисторе устойчивость к лавинному пробую достигается за счет уменьшения сопротивления базы паразитного *NPN*-транзистора [3] и смещения области лавинного пробоя из-под области затвора в область под глубоким *p*+слоем [4]. Применение этого способа в транзисторе с канавочным затвором показано на рис. 2.

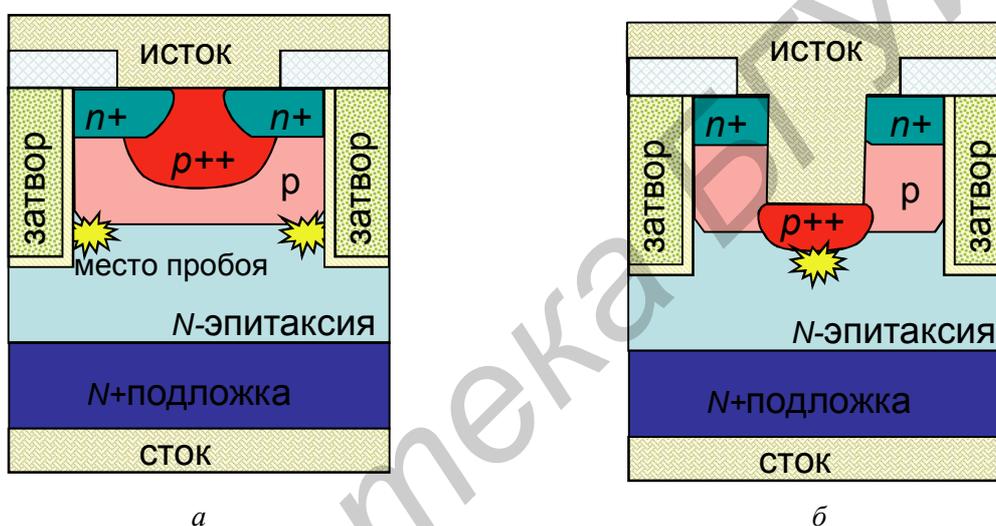


Рис. 2. Место лавинного пробоя в *trench*-ячейке транзистора типовой конструкции (а) и транзистора с глубоким *p*+слоем (б)

В типовом транзисторе с канавочным затвором область пробоя сток-истока локализована в критической области: на пересечении *p-n* перехода (*p*-база/*N*-эпитаксиальная пленка) с канавочным затвором (рис. 2,а), т.е. у подзатворного окисла. Использование глубокого *p*+канавочного контакта к *p*-базе (рис. 2,б) смещает область пробоя в безопасное место. Однако для транзисторов с рабочим напряжением более 40 В данный прием имеет ряд ограничений:

- глубина канавочного *p*+контакта ограничена толщиной слоя затворного поликристаллического кремния, который должен быть толще, чем канавочный *p*+контакт. Толстый (более 0,8 мкм), поликристаллический кремний использовать нецелесообразно из-за усложнения процесса планаризации межслойного диэлектрика и из-за проблем формирования глубоких канавочных контактных окон в толстом межслойном диэлектрике;

- максимальная глубина канавочного *p*+контакта ограничена возможностью технологии осаждения металла в единичный контакт, ширина которого зависит от возможности фотолитографического оборудования конкретной фабрики и составляет 0,18–0,5 мкм.

Поэтому для приборов с рабочим напряжением более 40 В данный подход оказывается неэффективным, так как глубина *p*-базы для таких приборов составляет более 1,5 мкм. Использование планарного контакта и глубокого *p*+истока нецелесообразно, так как приведет к чрезмерному увеличению размера ячейки транзистора из-за необходимости обеспечения должного зазора между *p*+истоком и канавкой.

В данной работе предложена и успешно опробована конструкция прибора для рабочих напряжений более 40 В, позволяющая сместить место лавинного пробоя из критической области ячейки на периферийную область транзистора.

Расчеты, проведенные нами с использованием стандартного пакета САПР TCAD SINOPSYS, показывают, что в типовых транзисторах с канавочным затвором с рабочим напряжением 100 В наиболее критичным местом в обеспечении устойчивости к лавинному пробую является крайняя канавка и нулевое охранное кольцо. Если они не находятся под одним потенциалом из-за неравномерного контакта или отсутствия контакта к нулевому кольцу, то напряженность поля на боковой поверхности крайней канавки может достигать  $3,65 \times 10^6$  В/см и приводить к пробую подзатворного окисла (рис. 3,а). Поэтому для повышения устойчивости к лавинному пробую должны быть обеспечены следующие условия:

- конструкция нулевого охранного кольца и крайней ячейки должна обеспечивать равномерный контакт на протяжении всего периметра охранного кольца; если контакт к истоковой области ячейки транзистора и контакт к нулевому охранному кольцу закорочены металлом, то напряженность электрического поля снижается с  $3,65 \times 10^6$  В/см до  $1,03 \times 10^6$  В/см (рис. 3,б);

- конструкция нулевого охранного кольца также должна смещать на себя область лавинного пробоя из области ячейки. Данная задача решается конструктивно за счет нулевого охранного кольца  $p$ -типа, залегающего глубже  $p$ -области в ячейке.

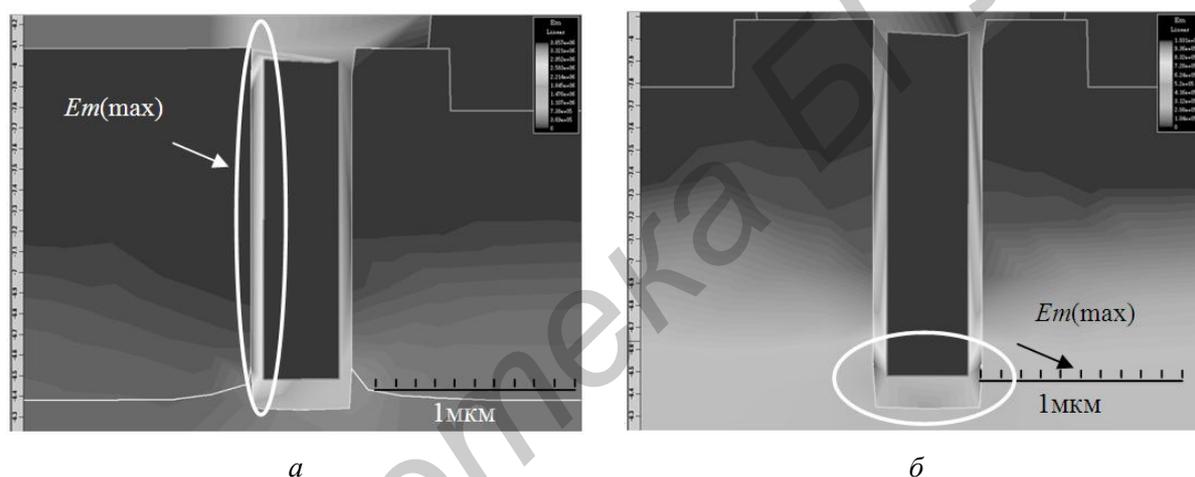


Рис. 3. Максимальная напряженность электрического поля в подзатворном окисле: а –  $3,65 \times 10^6$  В/см – ячейка и нулевое охранное кольцо не закорочены металлом; б –  $1,03 \times 10^6$  В/см – ячейка и нулевое охранное кольцо закорочены металлом

Результаты расчета, представленные на рис. 4, показывают, что пробой транзистора локализуется под нулевым охранным кольцом. Напряжение лавинного пробоя транзистора увеличивается с 111,2 В до 122,5 В за счет снижения напряженности электрического поля в подзатворном окисле и смещения области лавинного пробоя на нулевое охранное кольцо.

Такого эффекта также можно достичь за счет:

- диффузионного размерного эффекта, при котором глубина диффузии  $p$ -области транзистора в нулевом охранном кольце шириной 20 мкм примерно на 0,5 мкм больше, чем глубина  $p$ -области в ячейке транзистора шириной 1,5 мкм;
- введения дополнительной примеси  $n$ -типа в область нулевого охранного кольца путем добавления в маршрут операций фотолитографии и легирования фосфором.

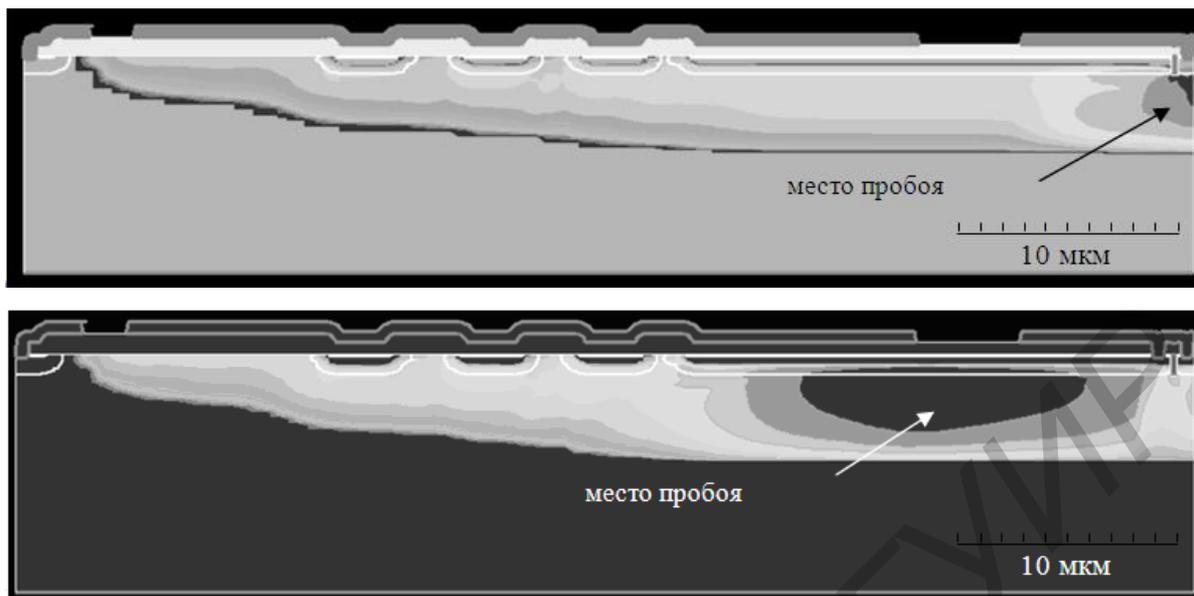


Рис. 4. Место локализации лавинного пробоя: *a* – нулевое охранное кольцо и ячейка транзистора не закорочены металлом. Напряжение лавинного пробоя 111,2 В; *б* – нулевое охранное кольцо глубже примерно на 0,5 мкм, чем *p*-область в ячейке и закорочена с ней металлом. Напряжение лавинного пробоя 122,5 В

### Экспериментальные результаты

По результатам проведенных расчетов изготовлен и исследован транзистор с затвором канавочного типа с равномерным по всему периметру контактом к нулевому охранному кольцу, рассчитанный на пробивное напряжение 120 В. Кольцо и исток транзистора закорочены металлом. Таким образом он постоянно находится под потенциалом истока.

Технология изготовления прибора включала в себя следующие основные операции:

- наращивание эпитаксиального слоя *n*-типа проводимости на сильнолегированной подложке *n*+типа;
- формирование охранных колец для обеспечения пробивного напряжения исток-сток (область нулевого и остальных охранных колец формировали ионным легированием бором так, что глубина областей охранных колец была на 0,5 мкм больше, чем глубина *p*-базы в ячейке транзистора);
- формирование затвора канавочного типа путем травления канавок в кремнии шириной 0,4 мкм с последующим окислением и заполнением канавок легированным поликристаллическим кремнием с *n*+типом проводимости;
- формирование *p*-базы транзистора ионным легированием бора и последующей разгонкой примеси;
- формирование *n*+истоков транзистора ионным легированием мышьяка и последующим отжигом;
- формирование межслойного диэлектрика и контактных окон к областям транзистора;
- напыление металла и формирование металлизированной разводки.

На стадии тестирования изготовленных транзисторов перед сборкой было отмечено, что приборы без контакта к нулевому охранному кольцу не выдерживают теста на контроль пробивного напряжения на токе 10-50 мА. Происходит прогорание ближайшей ячейки транзистора, расположенной у нулевого охранного кольца (рис. 5, *a*).

По экспериментальным данным рассчитывали энергию лавинного пробоя как  $E_{as} = 0,5LI^2$ , где  $L = 270$  мкГн – нагрузочная индуктивность,  $I$  – максимальный ток лавинного пробоя, который выдерживает прибор при разряде индуктивности на сток транзистора, нахо-

дящемся в закрытом состоянии. Результаты по выборке из 100 транзисторов каждого типа приведены в таблице.

Очевидно, что транзисторы, у которых отсутствует контакт к нулевому охранному кольцу, имеют очень низкие значения энергии лавинного пробоя. Место пробоя локализовано на угловых крайних ячейках (рис. 5,б).

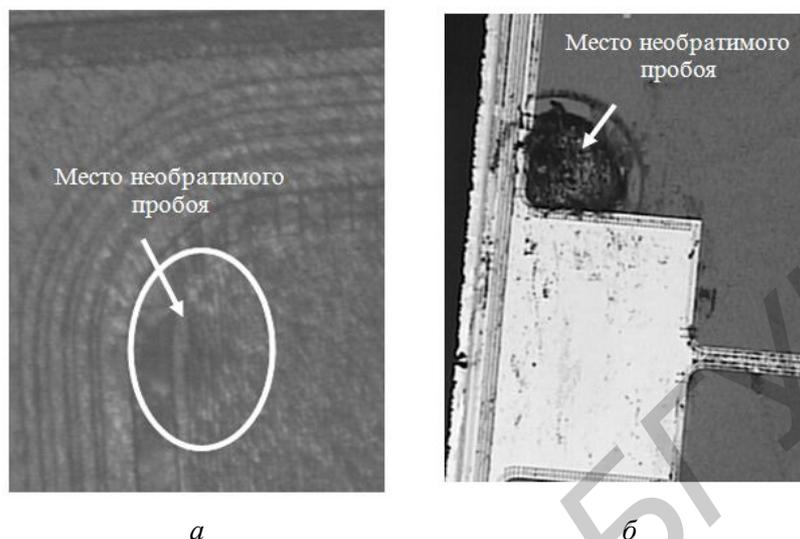


Рис. 5. Место необратимого пробоя в транзисторе: *а* – при тестировании кристаллов на пластине, *б* – при измерении энергии величины энергии лавинного пробоя на приборах

#### Параметры МОП транзисторов с канавочным затвором

Тип прибора		$I_{as}$ , А	$E_{as}$ , мДж	$BV_{ds}$ , В	$BV_{ds}$ , В расчет
Нулевое охранное кольцо закорочено с истоком	среднее	48	311	117,40	122,5
	мин	42	238	122,52	
	макс	52	365	125,10	
Контакт к нулевому охранному кольцу отсутствует	среднее	0,22	6,53	104,10	111,2
	мин	0,05	0,34	107,87	
	макс	0,54	39,3	109,40	

$I_{as}$  – ток лавинного пробоя, который выдерживает прибор при разряде индуктивности на сток транзистора, находящемся в закрытом состоянии;  $BV_{ds}$  – напряжение лавинного пробоя сток-исток на токе 10 мкА.

Конструкция с контактом к нулевому охранному кольцу, которое подключено к потенциалу истока, позволяет значительно увеличить устойчивость к лавинному пробоя транзистора с затвором канавочного типа. Величина энергии лавинного пробоя составляет минимум 238 мДж, что дает возможность использовать такие транзисторы для работы с индуктивной нагрузкой. При отсутствии контакта к нулевому охранному кольцу транзистор практически не держит тока лавинного пробоя, что объясняется пробоем подзатворного диэлектрика на крайних ячейках из-за превышения допустимой напряженности электрического поля в окисле, что было показано при расчетах конструкции (см. рис. 3). Результаты измерения напряжения лавинного пробоя хорошо согласуются с расчетными данными и подтверждают, что улучшение достигается за счет смещения места лавинного пробоя с области ячейки транзистора в область охранного кольца.

## Выводы

Расчетами показано и экспериментально подтверждено, что величина энергии лавинного пробоя мощных МОП транзисторов с затвором канавочного типа может быть увеличена за счет: использования конструкции нулевого охранного кольца с равномерным по всему периметру контактом, которое соединено металлическим проводником с истоком данного транзистора; использования нулевого охранного кольца, залегающего на 0,5 мкм глубже  $p$ -области в ячейке транзистора.

## MAINTENANCE OF STABILITY TO AVALANCHE BREAKDOWN OF POWER SILICON TRENCH-MOSFET

V.S. KOTAU, V.V. TOKAREV, V.E. BORISENKO

### Abstract

The simulations are carried out and possibility of increasing in stability to avalanche breakdown of silicon power trench - metal/oxide/semiconductor (mosfet) transistors is experimentally investigated by providing of lower breakdown voltage of guard ring in comparison with breakdown voltage of transistor cell and by making of uniform contact to all area of guard ring. Avalanche breakdown energy in such devices can be increased on one order of magnitude.

### Литература

1. US patent № 4,747,722; Aug. 30, 1988, Method for making planar vertical channel DMOS structures, Richard A. Blanchard
2. By Carl Blake, Tim McDonald, Dan Kinzer et al. // Power Electronics Technology. 2005. P. 40–44
3. International Rectifier, Application Note AN1005
4. Soo-Seong Kim, Jae-Keun Oh, Min-Koo Han // Jpn. J. Appl. Phys. 2003. №42. P. 2156–2158