

# Особенности конструкции и изготовления силовых МОП-транзисторов для космической электроники

**Владимир Котов** (vladimir.k@micronica-msq.com),  
**Владимир Токарев** (vvtokarev55@gmail.com)

**В статье рассмотрены особенности технологических процессов изготовления и конструкции мощных МОП-транзисторов, используемых в космической силовой электронике.**

Электронные приборы и системы, работающие в космическом пространстве, подвергаются непрерывному воздействию дестабилизирующих излучений (ДИ): протонов, электронов и тяжёлых ионов. Радиоактивное облучение этих систем создаёт серьёзные проблемы в бортовой электронике, составной частью которой являются мощные МОП-транзисторы с изолированным затвором (MOSFET – Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor), используемые в качестве основных ключевых элементов в электронных преобразовательных системах, включая системы бортового питания. Основными преимуществами мощных МОП-транзисторов по сравнению с другими ключевыми элементами являются высокое быстродействие, а также низкое сопротивление в открытом состоянии и потребляемая мощность в цепи управления [1].

Можно выделить два основных класса радиационных эффектов, которые могут произойти в мощных МОП-транзисторах во время или после воздействия ДИ (см. табл.):

1. Эффекты накопленной дозы (TID effects).
2. Эффекты, вызванные воздействием одиночных ионизирующих частиц (SEE – Single Event Effects) – высокоэнергетических тяжёлых ионов и

протонов (ТЗЧ – тяжёлых заряженных частиц).

Эффекты накопленной дозы связаны с ионизацией вещества излучением, т.е. с образованием под действием ДИ свободных носителей заряда [2], захват которых на ловушках в объёме облучаемого материала может привести к накоплению заряда в различных областях приборных структур (как правило, это различные диэлектрические слои) и вызвать деградацию параметров транзисторов. Кроме того, вследствие ионизационных эффектов в активных и пассивных областях транзисторов могут возникать импульсы ионизационных токов, которые могут привести к различным эффектам как обратимого (импульсные сигналы помех на выводах транзисторов), так и необратимого характера (вторичный пробой, пробой подзатворного диэлектрика).

Воздействие одиночных ионизирующих частиц (ОИЧ) приводит как к ионизации вещества вдоль трека одиночной частицы, так и к эффектам смещения из-за прямого взаимодействия с атомом материала транзисторов и выбивания его из узла решётки при сообщении ему некоторой энергии, а также вторичного взаимодействия выбитого атома с соседними (при этом может иметь место каскад атомных соударений, сопровождающийся вторич-

ными смещениями атомов), что также может приводить к ионизации вещества. В результате воздействия ОИЧ на мощный МОП-транзистор может произойти катастрофический отказ, вызванный перегоранием транзистора (SEB – Single Event Burnout) или пробоем подзатворного диэлектрика (SEGR – Single Event Gate Rupture) [3]. Чтобы избежать отказов мощных МОП-транзисторов, вызванных воздействием ОИЧ, проводится оценка их устойчивости к данным воздействиям путём соответствующих испытаний, например согласно методу 1080 стандарта MIL-STD-750 [4]. При этом данная оценка может носить приблизительный характер ввиду сложного реального энергетического спектра космического пространства.

Создание современных мощных МОП-транзисторов, менее чувствительных к ДИ космического пространства, сочетает в себе как технологические, так и конструктивные методы повышения стойкости, а также моделирование влияния дестабилизирующих излучений на этапе разработки технологии производства и конструкции транзисторов с помощью модуля моделирования воздействия ТЗЧ, встроенного в программу двумерного технологического и приборного моделирования TCAD Synopsys.

К технологическим методам относятся как разработка специализированных техпроцессов изготовления транзисторов, так и улучшение радиационных свойств слоёв и материалов, входящих в их конструкцию. В настоящее время это технология «кремний на карбиде кремния», специализированные операции создания диэлектрических слоёв и, в особенности, подзатворного диэлектрика и т.п. К конструктивным способам повышения стойкости относятся использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т.п.

Целью данной статьи является обсуждение особенностей технологических процессов производства и конструкции мощных МОП-транзисторов космической силовой электроники, большин-

**Классификация радиационных эффектов в мощных МОП-транзисторах**

Класс радиационного эффекта	Тип воздействия	Особенности воздействия
Накопленная доза	Изменение поверхностных свойств, появление импульсов ионизационных токов	<ul style="list-style-type: none"> <li>● эффект накопления деградации электрических параметров структур;</li> <li>● воздействие на всю площадь транзистора;</li> <li>● характеризуется максимальным изменением параметра (критерием отказа)</li> </ul>
Воздействие одиночных ионизирующих частиц	Изменение проводимости полупроводника, изменение свойств диэлектриков	<ul style="list-style-type: none"> <li>● вероятностное во времени событие;</li> <li>● короткое время воздействия (&lt;1 нс);</li> <li>● воздействие на небольшую часть элемента транзистора (позиция трека ОИЧ);</li> <li>● характеризуется вероятностью/частотой эффекта</li> </ul>

ство из которых используется в транзисторах как 4-го, так и 5-го и 7-го поколений, разработанных компанией «СКТБ „Микроника“» совместно с ООО «Тандем Электроника» (г. Воронеж, официальный представитель СКТБ «Микроника» в РФ) [5].

### ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К НАКОПЛЕННОЙ ДОЗЕ

В большинстве случаев эффекты накопления заряда в мощных МОП-транзисторах проявляются в постепенном ухудшении его электрических параметров из-за увеличения заряда в подзатворном диэлектрике, что приводит к изменению порогового напряжения и увеличению токов утечки транзистора.

Для всех типов технологий мощных МОП-транзисторов ключевыми моментами техпроцесса, увеличивающими стойкость к накопленной дозе, являются:

- уменьшение толщины подзатворного оксида  $t_{ox}$ . Сдвиг порогового напряжения в результате накопления заряда в окисле и на границе раздела «оксид кремния – кремний» составляет  $t_{ox}^{1,5-1,8}$  для оксидов, используемых в коммерческих технологиях, причём для пирогенного оксида сдвиг, обусловленный накоплением заряда в окисле, в 1,5...2 раза меньше, чем для оксида, выращенного в сухом кислороде [6];
- уменьшение температуры отжига в атмосфере азота подзатворного оксида кремния, которая должна быть не более +850...+875°C [7] с целью предотвращения создания дополнительных ловушек заряда, а также уменьшение температуры и времени высокотемпературных обработок после создания подзатворного диэлектрика;
- использование альтернативного подзатворного диэлектрика: перекисленного азотированного оксида (RNO – Reoxidized Nitrided Oxide) [8] или оксида гафния [9, 10].

### ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К SEGR

Для создания мощного МОП-транзистора, устойчивого к эффекту пробоя подзатворного диэлектрика при воздействии ТЗЧ, необходимо выполнение следующего условия: падение напряжения на подзатворном диэлектрике вдоль ионизационного трека ТЗЧ должно быть меньше критиче-

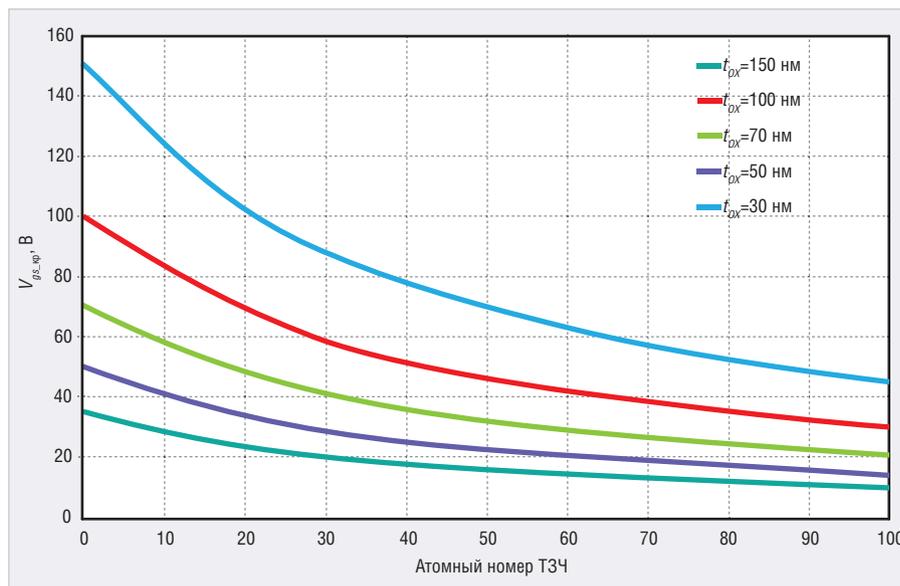


Рис. 1. Зависимость критического напряжения на затворе  $V_{gs\_кр}$  от атомного номера ТЗЧ для разной толщины подзатворного оксида

ского напряжения  $V_{gs\_кр}$  (измеряется в В), определяемого по формуле Titus-Wheatley [11] для диэлектрика из  $SiO_2$ , при условии воздействия ТЗЧ перпендикулярно поверхности подзатворного оксида:

$$V_{gs\_кр} = E_{BD} \times t_{ox} / (1 + Z/44), \quad (1)$$

где  $E_{BD}$  – напряжённость электрического поля, В/см;  $t_{ox}$  – толщина подзатворного оксида, см;  $Z$  – атомный номер ТЗЧ.

Зависимость критического напряжения  $V_{gs\_кр}$  от атомного номера ТЗЧ для разной толщины подзатворного оксида, рассчитанная с использованием выражения (1), представлена на рисунке 1 [11].

Когда ТЗЧ пересекает эпитаксиальный слой в JFET-области (между областями Р-базы (см. рис. 2)) планарного вертикального МОП-транзистора (VDMOS – Vertical Diffusion Metal Oxide Semiconductor), созданный ею ионизированный трек шунтирует JFET-область и тем самым подсоединяет границу раздела «подзатворный диэлектрик – эпитаксиальный слой» к более высокому напряжению стока  $V_{COUPLED}$  (см. рис. 3). Электрическое поле, вызванное этим напряжением, суммируется с уже имеющимся, что при превышении предела для используемого диэлектрика приведёт к его пробоям.

Эмпирическая зависимость напряжения  $V_{COUPLED}$  от линейной потери энергии (ЛПЭ, LET – Linear energy transfer) ТЗЧ для мощного МОП-транзистора с эпитаксиальным слоем толщи-

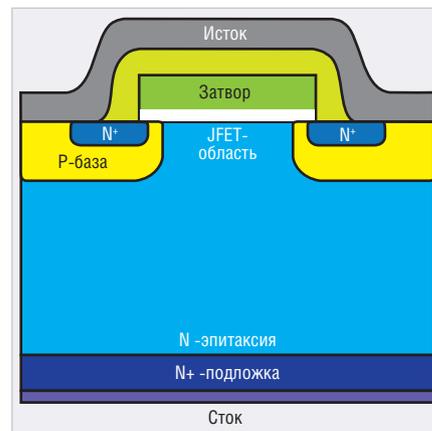


Рис. 2. Упрощённое поперечное сечение ячейки VDMOS

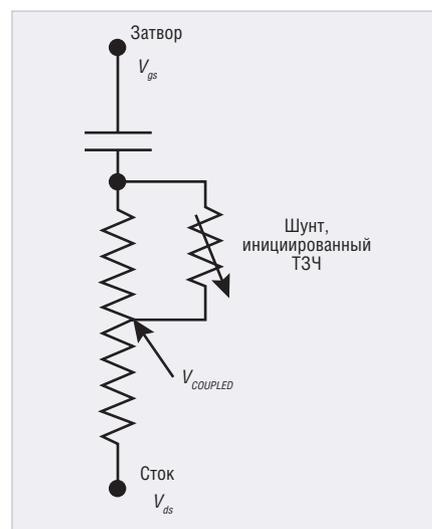


Рис. 3. Упрощённая модель шунтирования JFET-области транзистора при воздействии ТЗЧ

ной 7 мкм и глубиной Р-базы 2 мкм (см. рис. 4) представлена в работе [12]. Утверждается, что данная зависимость

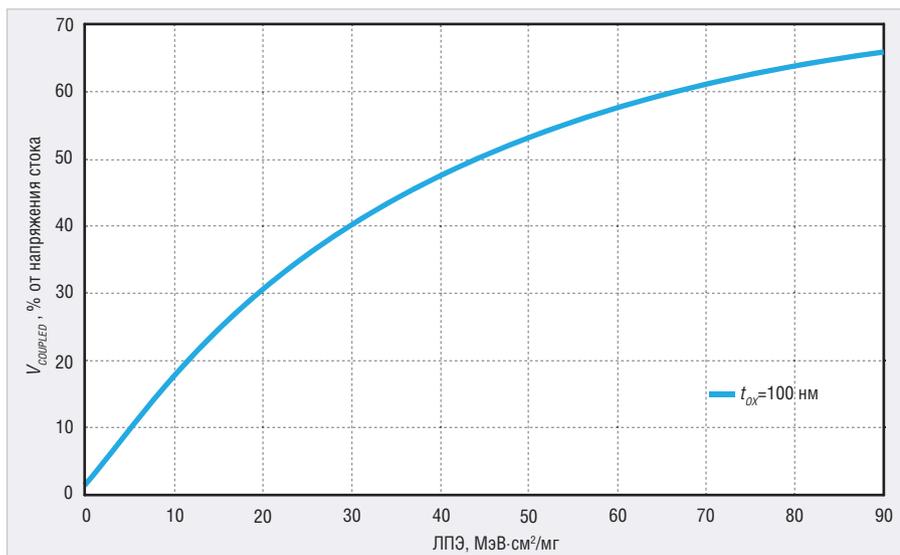


Рис. 4. Эмпирическая зависимость напряжения  $V_{COUPL}$  в % от напряжения стока – исток от ЛПЭ (LET)

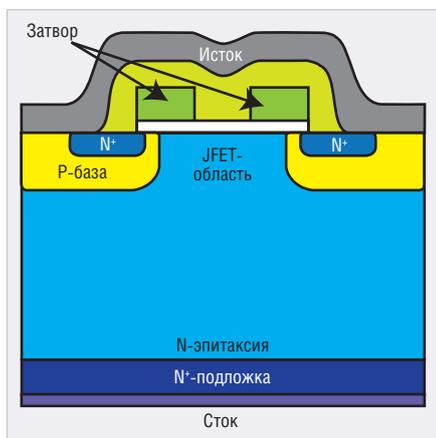


Рис. 5. Вид ячейки VDMOS с удаленной частью затвора

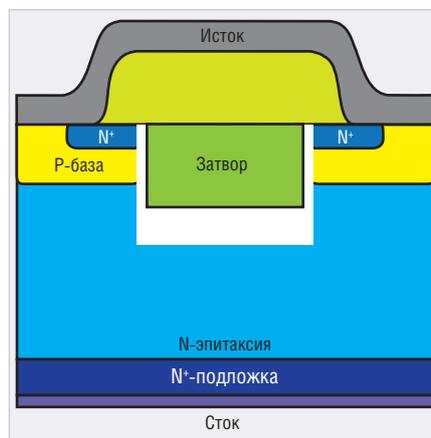


Рис. 6. Вид ячейки trench-MOS с утолщенным окислом на дне канавки

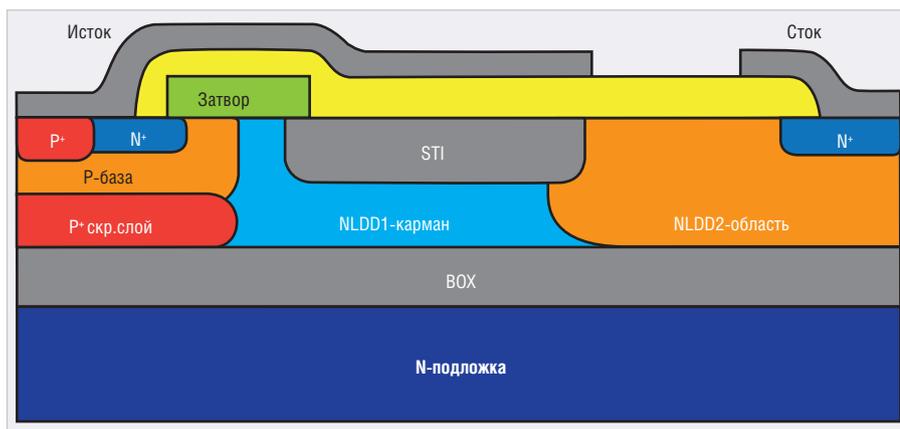


Рис. 7. Поперечный разрез структуры SOI LNDMOS-транзистора

будет определяться шириной (расстоянием между P-базами) и уровнем легирования JFET-области, глубиной и концентрацией примеси в базе, параметрами эпитаксиальной структуры.

Одним из первых способов увеличения стойкости мощных МОП-транзисторов к SEGR является использование полосковой структуры затвора

(Strip Cell) вместо сотовой (гексагональной, квадратной и пр.) [13] и оптимизация ширины JFET-области транзистора в сторону уменьшения. Причём преимущества полосковой структуры наиболее проявляются для напряжений стока – исток выше 40 В, при которых зависимость критического напряжения на затворе от напряжения на сто-

ке стремится к насыщению, тогда как для сотовой структуры затвора характер этой зависимости не изменяется.

Для МОП-транзисторов с большой длиной затвора уменьшить вероятность наступления SEGR-отказа позволяет удаление (вырезание) центральной части затвора, которая не участвует в работе транзистора (см. рис. 5) [14]. Причём для области подзатворного диэлектрика, над которой удалён затвор, по данным работы [14], критическое напряжение увеличивается, например с 17 до 27 В. Следует отметить, что данный способ усложняет технологический процесс, так как требует защиты открытой части подзатворного окисла от нежелательных воздействий технологического процесса.

В мощных МОП-транзисторах с канавочной структурой увеличение устойчивости к SEGR достигается за счёт использования толстого окисла на дне канавки, причём граница этого окисла должна быть как можно ближе к границе P-базы (см. рис. 6).

Существенное улучшение стойкости к SEGR достигается в горизонтальных мощных МОП-транзисторах на КНИ-подложке (SOI LNDMOS-транзисторы), в которых ионизированный трек от воздействия ТЗЧ физически не может проходить через подзатворный диэлектрик и большую часть стока транзистора. В такой структуре (см. рис. 7) STI-изоляция (Shallow Trench Isolation, изоляция мелкими канавками) играет роль дополнительного «экрана» и прерывает ионизированный трек от ТЗЧ, лежащих под углом к поверхности подзатворного диэлектрика. Транзисторы данного типа с рабочим напряжением 150 В, изготовленные по 0,35 мкм технологии, имеют на 10–15% большее значение сопротивления канала в открытом состоянии, чем классические вертикальные МОП-транзисторы, изготовленные по радиационно стойкой технологии, но в то же время они устойчивы к SEGR во всём рабочем диапазоне напряжений стока и затвора и у них на порядок меньше заряд затвора и время восстановления [15]. Основным недостатком данной структуры является снижение пробивного напряжения стока – исток от накопленной дозы по причине накопления заряда в скрытом окисле (BOX – Buried OXide) и STI-изоляции. В связи с тем что, по данным работы [16], основной вклад в снижение пробивного напряжения вносит накопление заряда в скрытом окисле, использование SiC-подложки

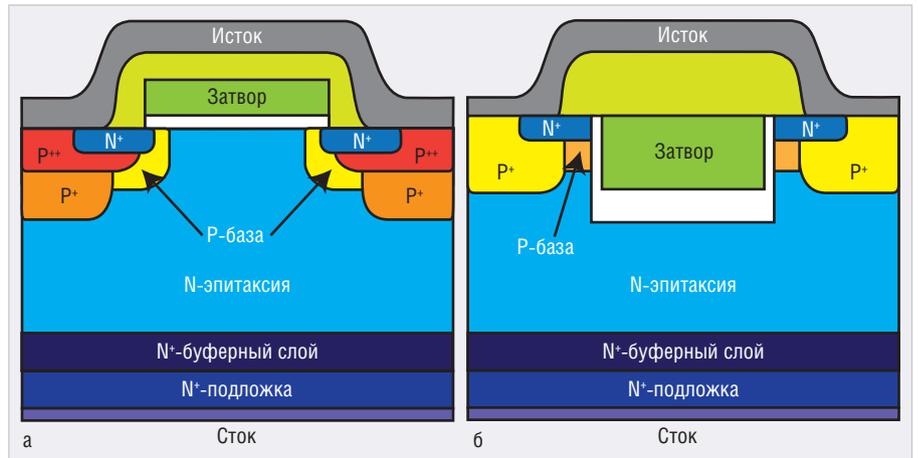
N-типа вместо SOI-структуры значительно увеличивает стойкость LNDMOS-транзисторов к TID.

**Повышение стойкости к SEB**

Известно, что стойкость к SEB для МОП-транзисторов определяется их устойчивостью к вторичному пробоя [17], который происходит при включении паразитного NPN-транзистора (N-сток – P-база – N-исток). Когда транзистор находится в нормальном закрытом состоянии, при напряжении, превышающем напряжение вторичного пробоя, ток, образующийся вследствие рассасывания зарядов ионизированного трека после воздействия ТЗЧ, может быть достаточным для включения паразитного NPN-транзистора и тем самым перевода транзистора из нормально закрытого состояния в состояние вторичного пробоя и его выгорания. Вторичный пробой хорошо моделируется программой TCAD Synopsys, в связи с чем значительно упрощается разработка технологического процесса и конструкции МОП-транзистора, устойчивого к SEB.

К основным практическим и экспериментально подтвержденным приемам, увеличивающим напряжение вторичного пробоя мощных вертикальных МОП-транзисторов для космической электроники, относятся:

- уменьшение паразитного сопротивления P-базы посредством создания глубокого P<sup>+</sup>-слоя в области контакта к базе и P<sup>++</sup>-слоя под областью N<sup>+</sup> истока (см. рис. 8);
- выращивание N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя между низкоомной подложкой и приборным N-эпитаксиальным слоем (см. рис. 8) [17, 18];



**Рис. 8. Вид ячейки МОП-транзистора с повышенной стойкостью к вторичному пробоя:**

а) планарного; б) с канавочной структурой

- оптимизация топологии N<sup>+</sup>-истоковых областей.

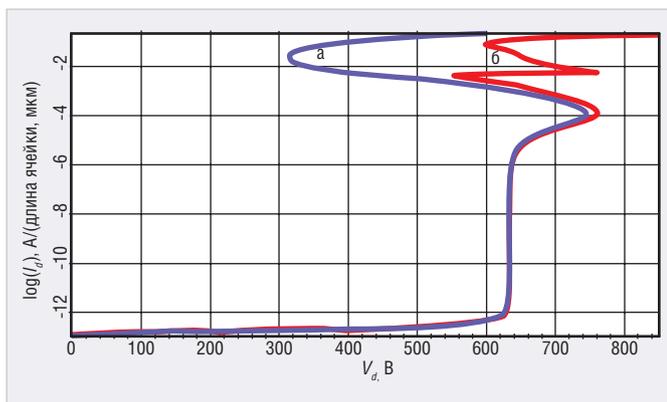
Если уменьшение паразитного сопротивления P-базы широко используется для коммерческих приборов с целью увеличения их стойкости к лавинному пробоя, то применение N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя позволяет дополнительно существенно увеличить напряжение вторичного пробоя. Из рисунка 9 видно, что для ячейки 600 В планарного МОП-транзистора использование N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя увеличивает напряжение вторичного пробоя с 320 до 550 В.

Следует отметить, что толщина и концентрация примеси в N<sup>+</sup>-буферном эпитаксиальном слое зависят от рабочего напряжения транзистора. По результатам моделирования исследованной ячейки 600 В МОП-транзистора с увеличением толщины (Т) N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя напряжение вторичного лавинного пробоя увеличивается и стремится к насыщению (см. рис. 10): при условии

$T1 < T2 = 2 \times T1 < T3 = 3 \times T1 < T4 = 4 \times T1$  напряжение вторичного пробоя составляет 430, 520, 545, 555 и 565 В соответственно. Зависимость напряжения вторичного лавинного пробоя от удельного сопротивления (R) N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя имеет максимум, что видно из анализа данных, представленных на рисунке 11: максимальное напряжение 520 В получено для условия  $1,25 \times R1$ .

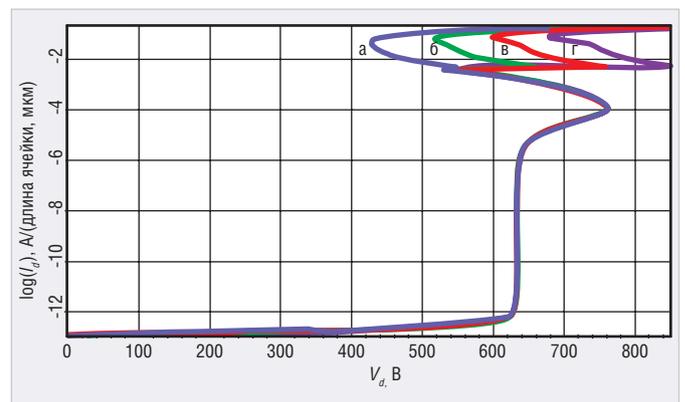
Оптимизация топологии и техпроцесса формирования N<sup>+</sup>-истоковых областей также предназначена для снижения влияния паразитного NPN-транзистора за счёт уменьшения паразитного сопротивления P-базы и эффективности коллектора паразитного транзистора. Она обычно включает в себя формирование шунтов между областями контакта с P-базой и областью P-базы под затвором (см. рис. 12), а также уменьшение дозы легирования N<sup>+</sup>-истоков [18].

Следует отметить, что все описанные методы, в том числе использование N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя,



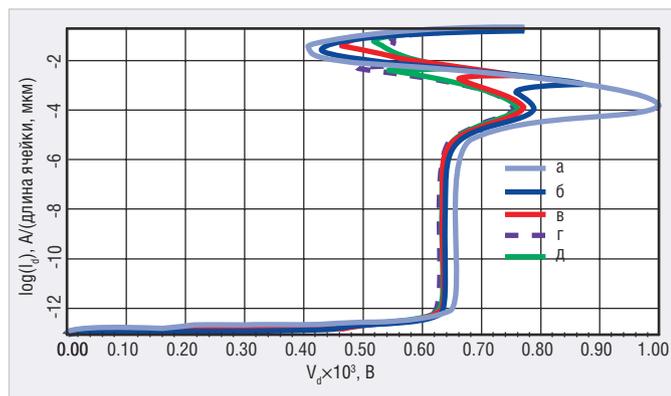
Примечание: I<sub>d</sub> – ток стока, V<sub>d</sub> – напряжение стока

**Рис. 9. Вид характеристики лавинного пробоя ячейки планарного МОП-транзистора:** а) без N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя; б) с N<sup>+</sup>-буферным эпитаксиальным слоем



Примечание: I<sub>d</sub> – ток стока, V<sub>d</sub> – напряжение стока

**Рис. 10. Вид характеристики лавинного пробоя ячейки планарного МОП-транзистора с различной толщиной (Т) N<sup>+</sup>-буферного эпитаксиального слоя:** а) T1; б) 2×T1, в) 3×T1, г) 4×T1



Примечание:  $I_d$  – ток стока,  $V_g$  – напряжение стока

**Рис. 11.** Вид характеристики лавинного пробоя ячейки планарного МОП-транзистора с различным удельным сопротивлением ( $R$ )  $N^+$ -буферного эпитаксиального слоя: а)  $42 \times R1$ , б)  $4,2 \times R1$ , в)  $2,1 \times R1$ , г)  $1,25 \times R1$ , д)  $R1$

увеличивают сопротивление транзистора в открытом состоянии, поэтому разработчики приборов всегда вынуждены находить компромисс между требуемым уровнем стойкости к SEB, электрическими параметрами и площадью кристалла.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

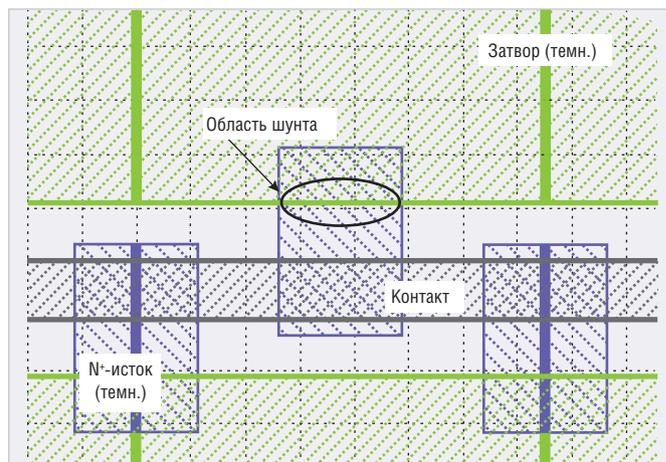
Рассмотренные ключевые приёмы, используемые в технологии изготовления и в конструкции мощных МОП-транзисторов, позволяют повысить их стойкость к воздействию ДИ космического пространства. Применение моделирования воздействия ТЗЧ на критические области транзистора на этапе его разработки с помощью специального программного модуля, встроенного в TCAD Synopsys, позволяет существенно сократить цикл разработки изделия.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Силовые полупроводниковые приборы. / Пер. с англ. под ред. В.В. Токарева. – Воронеж: Элистр, 1995.
2. Schwank J. Total Dose Effects in MOS Devices // Radiation Effects – From Particles to Payloads. IEEE NSREC Short Course. 2002.
3. Titus J.L., Wheatley C.F. Experimental studies of single event gate rupture and burnout

- in vertical power MOSFETs. IEEE Trans. Nucl. Sci. Apr. 1996. V. 43.
4. Method 1080.1. Single-Event Burnout and Single-Event Gate Rupture, Defense Logistics Agency (DLA) Land and Maritime MIL-STD-750F. Jan. 3. 2012.
5. Сайт ООО «Тандем Электроника»: <http://te.vrn.ru/index.html>
6. Schwank J.R., Shaneyfelt M.R., Fleetwood D.M., Felix J.A., Dodd P.E., Paillet P., Ferlet-Cavrois V. Radiation effects in MOS oxides // IEEE Trans. Nucl. Sci. Aug. 2008. V. 55. № 4.
7. Танепо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. – М.: Лаборатория знаний, 2012.
8. Lucovsky G., Fleetwood D.M., Lee S. et al. Differences between charge trapping states in irradiated nano-crystalline HfO and non-crystalline Hf silicates // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2006, V. 53. № 6.
9. Manchanda L., Weber G.R., Kim Y.O., Feldman L.C. et al. A new method to fabricate thin oxynitride/oxide gate dielectric for deep submicron devices // Microelectron. Eng., Aug. 1993. V. 22. № 1–4.
10. Dunn G.L., Wyatt P.W. Reoxidized nitrided oxide for radiationhardened MOS devices // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1989, V. 36. № 6.
11. Titus J.L., Wheatley C.F., Tyne K.M. et al. Effect of ion energy upon dielectric breakdown of the capacitor response in

- vertical power MOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1998. V. 45. № 6.
12. Wheatley C.F., Titus J.L., Burton D.I. Single-event gate rupture in vertical power MOSFETs: An original empirical expression // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 1994, V. 41. № 6.
13. Savage M.W., Burton D.I., Wheatley C.F., Titus J.L., Gillberg J.E. An improved stripe-cell SEGR hardened power MOSFET technology // IEEE Transactions on Nuclear Science. Dec. 2001. V. 48. № 6.
14. Allenspach M., Dachs C., Johnson G.H. et al. SEGR and SEB in N-Channel Power MOSFETs // IEEE Transactions on Nuclear Science. Dec. 1996. V. 43. № 6.
15. Shea P.M., Shen Z.J. Numerical and Experimental Investigation of Single Event Effects in SOI Lateral Power MOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci., Dec. 2011. V. 58. № 6.
16. Ali K.B., Gammon P.M., Chan C.W. et al. Single event effects and total ionising dose in 600V Si-on-SiC LDMOS transistors for rad-hard space applications // Solid-State Device Research Conference (ESSDERC). 2017 47th European.
17. Liu S., Boden M., Girdhar D.A., Titus J.L. Single-event burnout and avalanche characteristics of power DMOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci. Dec. 2006. V. 53. № 6.
18. Liu S., Titus J.L., Boden M. Effect of Buffer Layer on Single-Event Burnout of Power DMOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci., Dec. 2007. V. 54. № 6.



**Рис. 12.** Фрагмент топологии p-МОП-транзистора с оптимизацией слоя  $N^+$ -истока

**НОВОСТИ МИРА**

**«СБЕРБАНК» ЗАПУСКАЕТ АКСЕЛЕРАТОР В СФЕРЕ РОБОТОТЕХНИКИ**

«Сбербанк» в партнёрстве с Фондом развития интернет-инициатив (ФРИИ) разрабатывает программу акселерации проектов в сфере интеллектуальной робототехники. Программа сфокусирована на проектах: создание персо-

нальных роботов-ассистентов, логистических и коллаборативных промышленных роботов-манипуляторов, беспилотных автономных транспортных средств, промышленных экзоскелетов. Команды стартапов из разных регионов России в течение 3 месяцев смогут дорабатывать прототипы своих решений в мастерских профильной лаборатории «Сбербанка».

Они должны за это время найти точки роста бизнеса и каналы привлечения новых клиентов, сфокусироваться на самых прибыльных сегментах, а также подготовить MVP (Minimum Viable Product). При наличии спроса бизнес-подразделений «Сбербанка» на продукт команды смогут реализовать пилотный проект прямо в «Сбербанке».

# SEMIEXPO RUSSIA

ЭКСПОЦЕНТР  
Россия, Москва  
29-30 мая 2018 года

[semiexpo.ru](http://semiexpo.ru)