

# Конструктивно-технологические особенности ДМОП и БТИЗ, устойчивых к спецфакторам

Владимир Бойко, Борис Бубукин, Александр Кастрюлёв (г. Воронеж)

**Проблемы устойчивости ЭКБ силовой электроники к различным видам ионизационного излучения не теряют актуальности и по сей день. ОАО «ВЗПП-С», имея более чем 15-летний опыт разработки и производства полупроводниковых приборов, интенсивно занимается данными вопросами и предлагает свои решения.**

В 2003 году завод освоил серийное производство БТИЗ KE705A/Б/В/Г для электронного зажигания автомобилей. В этих приборах впервые удалось практически решить проблему паразитного тиристора при переключении тока коллектора 14 А на напряжение 360 или 400 В для разных групп, а также решить проблему получения диодов Зенера в слое поликремния с заданными значениями пробивного напряжения и токов утечки. Наличие диодов Зенера в цепях затвор-эмиттер и затвор-коллектор делает эти транзисторы устойчивыми к статическому электрическому разряду с напряжением до 6000 В. В дальнейшем были отработаны технологические процессы производства мощных низкочастотных БТИЗ (время выключения менее 1,5 мкс) на напряжения 600 и 1200 В и постоянный ток 50 и 35 А соответственно. Но в условиях дороговизны эпитаксиального кремния и жёсткой конкуренции со стороны западных фирм, отечественные разработки не получили путёвку в жизнь.

Космические исследования и практическое использование космического пространства, развитие ядерной энергетики и необходимость защиты электронной аппаратуры в условиях радиационного излучения потребовали от производителей электронной аппаратуры и, как следствие, от производителей компонентов этой аппаратуры повышения стойкости к воздействию этих спецфакторов (СФ).

Выяснилось, что излучения оказывают отрицательное влияние практически на все слои полупроводниковых приборов (п/п) не только в процессе воздействия, но и оставляют «след» после его прекращения.

Известны [4] следующие основные эффекты воздействия радиационного излучения (в т.ч. ТЗЧ космического пространства) на п/п приборы и радиоэлектронную аппаратуру:

- структурные повреждения п/п прибора, приводящие к изменению времени жизни и концентрации носителей;
- дозовые эффекты в окислах и на границах раздела окисел-полупроводник, приводящие к изменению зарядов в МОП-структурах;
- фотоэффекты в р–n-переходах, приводящие как к возникновению избыточных токов в проводниках, так и к проявлению тиристорного эффекта;
- эффекты одиночных событий при воздействии протонов, ТЗЧ и термоядерных нейтронов, приводящие к потере информации, прожигу или тиристорному эффекту;
- электромагнитные эффекты, приводящие к наведению потенциалов, паразитных токов и электрическим пробоям.

Российские предприятия не остались в стороне от решения проблем повышения радиационной стойкости производимой ими ЭКБ. С 70-х годов прошлого столетия завод ВЗПП-С выпускает серию радиационностойких микросхем по технологии КСДИ, по которой диэлектрическая изоляция компонентов предохраняет микросхемы от тиристорного эффекта и фотоэффектов в р–n-переходах.

По этому пути в настоящее время идут все производители радиационно-стойких микросхем на основе Si, технологии КНС и КНИ – это практическое развитие технологии КСДИ в современных условиях. Однако технологические особенности создания ЭКБ силовой электроники требуют более специфичного подхода к методам повышения устойчивости к СФ.

Современные силовые ДМОП-транзисторы и БТИЗ – это, по сути, БИС с большим количеством (более 50–100 тыс.) элементарных ячеек, параллельно соединённых полевых транзисторов, на одном кристалле, состоящих из следующих конструктивных элементов:

- *подложки*, представляющей кремниевую эпитаксиальную или неэпитаксиальную пластину с заданными значениями толщины и удельного сопротивления в соответствии с параметрами транзистора;
- *матрицы ячеек латерального или канального (трэнч) МОП-транзистора* с заданной конструкцией ячеек: шаг и форма ячеек, расстояние между ячейками, глубина канальной, истоковой и других областей, толщина подзатворного диэлектрика, определяющих основные параметры транзистора;
- *периферийной области транзистора*, расположенной между матрицей ячеек и краем кристалла, определяющей в большой степени пробивное напряжение транзистора.

Разберём последовательно виды воздействий и решения, используемые в силовых приборах, для их частичной нейтрализации с целью повышения радиационной стойкости.

1. Структурные повреждения п/п прибора, влекущие за собой изменение времени жизни и концентрации носителей, в итоге приводят к снижению значений пробивного напряжения и токов утечки. Причём очевидно, что наиболее страдает поверхность п/п. При этом наибольшее влияние оказывается на более высокоомную область п/п, какой и является периферия.

Периферия большинства современных высоковольтных транзисторов (да и диодов тоже) обычно представляет собой набор диффузионных областей в виде концентрических окружностей вокруг активной области. Расстояния между кольцами задаются в соответствии с необходимым значением пробивного напряжения и с учётом удельного сопротивления кремния.

Недостатком кольцевой периферии является то, что они занимают «лишнее» место на периферии п/п, т.к. сами кольца имеют определённую ширину, а расстояния между ними открыты для проникновения подвижных ионов, а также подвержены полемому воздействию зарядов в окисле. В результате воздействия ионизирующих излучений изменение удельного со-

противления поверхности п/п нарушает условия оптимальности расстояний между кольцами, что может приводить как к повышению утечек, так и к снижению пробивных напряжений.

2. Дозовые эффекты в окислах и на границах раздела окисел-полупроводник, приводящие к изменению зарядов в МОП-структурах и, как следствие, к изменению порогового напряжения и поверхностного сопротивления, приводящего к снижению пробивного напряжения и повышению утечек по периферии ПП.
3. Фотоэффекты в р-n-переходах и эффекты одиночных событий при воздействии протонов, ТЗЧ и термоядерных нейтронов, приводящие к отпирантию паразитных n-p-n-транзисторов в ячейках n-канальных (или n-p-n-транзисторов в ячейках р-канальных) ДМОП-транзисторов, а в БТИЗ совместно с активным n-p-n-транзистором – к тиристорному эффекту.
4. Электромагнитные эффекты, приводящие к наведению потенциалов и электрическим пробоям подзатворного диэлектрика (см. рис. 1 [3]), имеющего пробивное напряжение

от 30 В (гарантируется 100% контролем) до 80 В фактически.

Для снижения уровней отрицательного воздействия каждого из вышеперечисленных факторов радиационного излучения разработчиками ВЗПП-С предложены следующие конструктивно-технологические решения:

1. Защита подзатворного диэлектрика диодами Зенера в слое поликремния (см. рис. 2), что повышает более чем на порядок стойкость транзисторов к статическим электрическим разрядам.
2. Опыт изготовления диодов Зенера в слое поликремния позволил не только разработать БТИЗ для систем электронного зажигания автомобилей, защищённого от статэлектрических разрядов до 6000 В, но и разработать в дальнейшем спиральную периферию в слое поликремния с ДЗ (см. рис. 3), нечувствительную к стационарным и подвижным зарядам в межслойном и защитном (пассивирующем) диэлектриках. Преимущества спиральной периферии заключаются в том, что она:
  - занимает меньше места, чем кольцевая (нет затрат поверхности

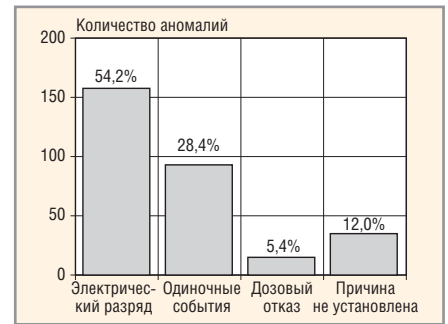


Рис. 1. Влияние эффектов электризации на РЭА космических аппаратов

на диффузионные кольцевые области);

- экранирует поверхность периферии п/п от воздействия полей зарядов, расположенных выше слоя поликремния, в котором изготовлена спираль.

Кроме того, расстояния между витками зависят только от стойкости межвиткового диэлектрика к распределённому напряжению между витками по формуле:

$$0,5T > w > K \times U_w / E_{кр,д}, \quad (1)$$

где  $T$  – шаг спирали,  $w$  – расстояние между витками спирали,  $U_w$  – напря-

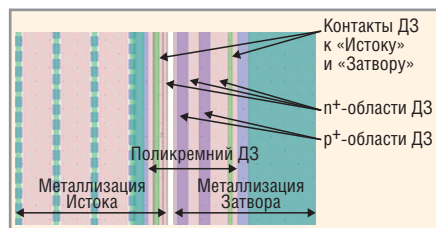


Рис. 2. Конструкция диодов Зенера в слое поликремния вокруг ВКП—«Затвор»

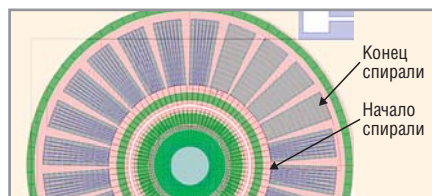


Рис. 3. Высоковольтный диод со спиральной периферией в слое поликремния с ДЗ (показано без металлизации)

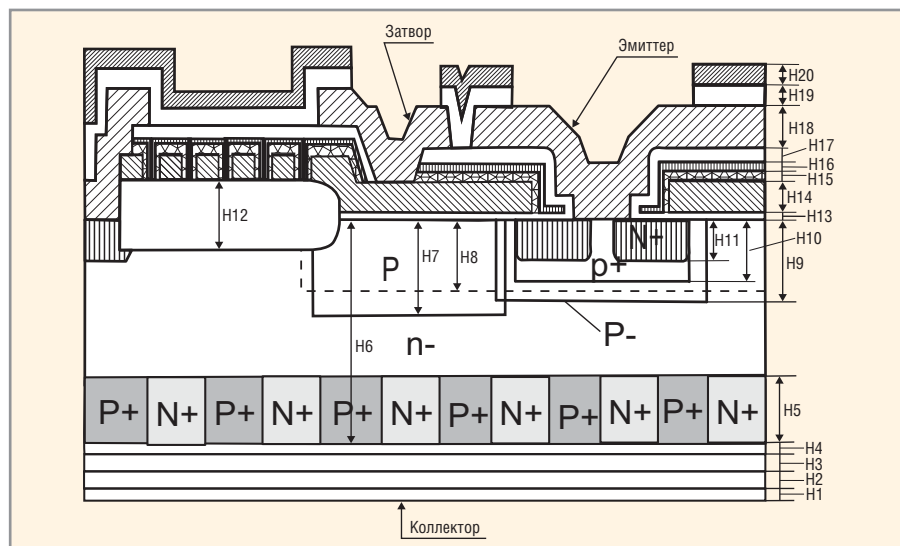


Рис. 4. Мощный радиационно-стойкий быстродействующий БТИЗ с обратным диодом и периферией в виде спирали с ДЗ и с ДЗ-защитой «Затвор-Исток» в слое поликремния

жение между соседними витками спирали,  $E_{крд}$  – критическая напряжённость поля в диэлектрике между витками спирали перед пробоем,  $K$  – коэффициент запаса по пробивному напряжению диэлектрика между витками спирали и, следовательно, не зависит от удельного сопротивления кремния, т.е. спираль не теряет своих свойств при воздействии ионизирующих излучений, что выражается в снижении утечек и повышении стабильности пробивного напряжения относительно п/п с кольцевой перифе-

рией, занимающей равную поверхность.

- Использование специального радиационно-стойкого технологического процесса, при котором подзатворный диэлектрик не подвергается температурным обработкам выше температуры его образования, что повышает стабильность порогового напряжения. Специально проведённая работа [2] по анализу дефектообразования в подзатворном диэлектрике МОП-транзисторов в технологическом процессе изготовления силового МОП-транзистора в рамках НИР «Ис-

следование и разработка технологии изготовления радиационно-стойких силовых транзисторов» позволила определить операцию, наиболее ответственную за максимальное влияние на дефекты в подзатворном диэлектрике (см. таблицу), и найти способ их снижения.

- Использование самосовмещённых технологических процессов, при которых значительно ослабляется коэффициент усиления паразитного транзистора, параллельного МОП-транзистору, приводит к значительному повышению стойкости к тиристорному эффекту при переключении высоких значений тока в условиях работы п/п с индуктивной нагрузкой и высокой энергией лавинного пробоя без ограничения пробивного напряжения. Повышение стойкости к тиристорному эффекту в свою очередь повышает стойкость к фотоэффектам в р-п-переходах и эффектам одиночных событий при воздействии протонов, ТЗЧ и нейтронов.

Приведённый выше опыт позволил создать ряд высоковольтных радиационно-стойких БТИЗ с обратным диодом [5] на напряжения 1200 и 1700 В и постоянный ток 35 и 20 А (время выключения менее 150 нс), конструкция которого приведена на рисунке 4.

### ЛИТЕРАТУРА

- Патент № 2379786 от 02.09.2008 г. «Периферия полупроводникового прибора, нейтрализующая влияние зарядов на стабильность обратных утечек и пробивного напряжения». ОАО «ВЗПП-С».
- Потов В.Д. Отчёт по теме «Анализ дефектообразования в подзатворном диэлектрике МОП-транзисторов в технологическом процессе их изготовления» в рамках НИР «Исследования и разработка технологии изготовления радиационно-стойких силовых транзисторов». 2006 г.
- Герасимчук О.А., Етифанцев К.А., Скоробогатов П.К. «Подпороговые эффекты повреждения микросхем при воздействии на их выводы серий импульсов напряжения». ОАО «ЭНПО СПЭЛС» НИЯУ «МИФИ». Доклад на конференции 2011 г. (г. Нижний Новгород).
- Улимов В.Н. «Базовые механизмы формирования радиационных эффектов в п/п, ИС и РЭА». Доклад на конференции 2010 г. (г. Пицунда).
- Патент № 2370855 от 18.02.2008 г. «Транзистор с ограничением тока и способ его изготовления». ОАО «ВЗПП-С».

### Результаты расчёта концентрации дефектов оксида кремния

№	Наименование операции	T+273, К	t, мин	N <sub>деф.обр.</sub> , см <sup>-3</sup>	N <sub>деф.</sub> , см <sup>-3</sup>
1	Формирование подзатворного оксида	1123	80	4,23×10 <sup>15</sup>	4,23×10 <sup>15</sup>
2	Осаждение материала затвора	913	240	2,53×10 <sup>16</sup>	2,52×10 <sup>16</sup>
3	Формирование р+ областей. Разгонка бора	1273	60	4,75×10 <sup>18</sup>	4,76×10 <sup>18</sup>
		1423	360	1,88×10 <sup>21*</sup>	1,88×10 <sup>21*</sup>
		1273	90	1,07×10 <sup>19</sup>	1,80×10 <sup>20</sup>
4	Формирование n+ областей. Разгонка фосфора	1213	30	3,85×10 <sup>17</sup>	1,31×10 <sup>20</sup>
5	Формирование межслойного диэлектрика	1073	180	6,15×10 <sup>17</sup>	2,10×10 <sup>19</sup>
		1173	20	7,59×10 <sup>16</sup>	1,88×10 <sup>19</sup>
		1075	180	6,47×10 <sup>17</sup>	3,79×10 <sup>18</sup>
		1123	15	1,42×10 <sup>16</sup>	3,67×10 <sup>18</sup>
6	Отжиг контактов	1123	70	3,10×10 <sup>17</sup>	3,43×10 <sup>18</sup>
7	Вжигание алюминия	783	20	3,45×10 <sup>11</sup>	3,43×10 <sup>18</sup>
8	Осаждение защитного оксида	723	60	1,44×10 <sup>11</sup>	3,43×10 <sup>18</sup>
9	Снятие механических напряжений	623	180	4,49×10 <sup>7</sup>	3,43×10 <sup>18</sup>

\* Наибольшую концентрацию дефектов вносит операция «Разгонка бора»