

# КНИ-биполярные и VCD-процессы для ИМС космической силовой электроники

Владимир Котов, Владимир Токарев (vvtokarev55@gmail.com)

В статье описаны преимущества использования КНИ-биполярных и VCD-техпроцессов для ИМС космической силовой электроники, используемых в DC/DC-модулях систем вторичного электропитания с бортовым питанием 27 и 100 В, в конечных DC/DC-преобразователях, в драйверах управления затворами MOSFET и IGBT и других устройствах. Рассматриваются отличительные особенности КНИ-биполярных и VCD-процессов в сравнении с обычными техпроцессами для космической электроники.

Качеству и надёжности аппаратуры космической техники всегда уделяется огромное внимание. В настоящее время к электронной компонентной базе (ЭКБ), применяемой в космической аппаратуре, предъявляются следующие особые требования:

- наработка на отказ не менее 150 000 часов, срок службы не менее 25 лет;
- стойкость к воздействию дестабилизирующих излучений (ДИ) космического пространства:
  - к накопленной дозе (НД) – не менее 80–300 крад;
  - к воздействию тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) – пороговое значение линейных потерь энергии (ЛПЭ) не ниже 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг;
- работа в расширенном диапазоне температур (от –60 до +125°С);
- работа в условиях вакуума и невесомости (при отсутствии конвективного теплообмена).

Создание современной ЭКБ, стойкой к ДИ космического пространства, невозможно без применения совокупности технологических, конструктивных и схемотехнических методов, а также без проведения моделирования влияния дестабилизирующих излучений на этапе проектирования компонентов. К технологическим методам относятся как разработка специализированных техпроцессов изготовления ИМС, так и улучшение радиационных свойств слоёв и материалов, входящих в конструкцию ИМС или её элементной базы. В настоящее время такими методами являются: технология «кремний на изоляторе» (КНИ), специализированные операции создания диэлектрических слоёв, в особенности подзатворного диэлектрика (GOX) и скрытого слоя оксида кремния

(BOX) в КНИ-структурах. К конструктивным способам повышения стойкости относится использование специальных корпусов, методов локальной защиты и т.п. Схемотехнические методы включают в себя использование специализированных схемотехнических решений для блоков ИМС, применение библиотек элементов с мажоритированием на уровне вентилях, кодеров, декодеров Хэмминга, так называемых «резервных» библиотек элементов, отбор библиотечных компонентов, разработка эффективных блоковых кодов и ряд других приёмов [1, 2].

В настоящей статье описываются преимущества использования КНИ-биполярных и VCD-техпроцессов для ИМС космической силовой электроники.

## Техпроцессы для ИМС космической силовой электроники

В космической силовой электронике ИМС в основном применяются в DC/DC-модулях систем вторичного электропитания, в конечных DC/DC-преобразователях систем распределённого питания, в драйверах электромоторов, драйверах плазменных панелей, электронных трансформаторах и другой преобразовательной аппаратуре.

Схемотехника DC/DC-модулей систем вторичного электропитания с бортовым питанием 27 и 100 В основана на использовании ИМС ШИМ-контроллеров, операционных усилителей (ОУ) и компараторов, прецизионных регулируемых стабилизаторов, LDO-регуляторов [3]. Перечисленные классы ИМС традиционно изготавливаются по радиационно стой-

кой 20–40 В биполярной технологии. Основные производители ИМС данного класса – Texas Instruments, STMicroelectronics, Microsemi, Linear Technology, Aeroflex.

ИМС классических конечных DC/DC-преобразователей представляют собой неизолированные импульсные понижающие стабилизаторы напряжения с синхронным или асинхронным выпрямлением со встроенными в ИМС или внешними силовыми транзисторами. Конечный DC/DC-преобразователь также может иметь в своём составе LDO-регулятор. Малые размеры преобразователей напряжения достигаются за счёт использования высокой частоты переключения (до 1 МГц) и схемы контроля выходного тока, что позволяет, соответственно, уменьшить размер индуктивности и снизить количество компонентов. Так как конечные преобразователи, как правило, преобразуют напряжение порядка 3,3...5,0 В в стабилизированное напряжение в диапазоне 0,8...1,5 В, то ИМС для них изготавливается по радиационно стойким низковольтным (7–15 В) биполярной или КМОП-технологиям. В случае использования более высоких входных напряжений 8–15 В для изготовления ИМС данного класса обычно применяют радиационно стойкий 20–40 В VCD-процесс. Основные производители ИМС данного класса – фирмы Texas Instruments и Linear Technology.

ИМС драйверов предназначены для использования в драйверах электромоторов (управление затворами MOSFET и IGBT), в *bust* или *buck* AC/DC-инверторах, драйверах плазменных панелей, электронных трансформаторах. Основным технологическим процессом для изготовления ИМС данного класса является 100–400 В радиационно стойкий VCD-процесс.

Технологические и конструктивные методы, используемые при разработке и изготовлении вышеназванных классов ИМС, позволяют получать стойкость к НД на уровне 30–100 крад и к воздействию ТЗЧ не ниже 30–60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг. Дальнейшее совершенствование технологического процесса позволяет не

только увеличить стойкость ИМС к ДИ, но и повысить надёжность ИМС за счёт упрощения схемотехнических решений. Из последних достижений в этой области следует отметить использование КНИ-технологии для производства ИМС космической электроники.

В технологии КНИ приборный слой монокремния электрически изолирован от остальной части кремниевой подложки и элементы ИМС электрически изолированы друг от друга канавками, заполненными оксидом кремния.

- Это позволяет:
- полностью исключить эффект защёлки;
  - исключить токи утечки в подложку, которые экспоненциально увеличиваются с ростом температуры;
  - уменьшить паразитные ёмкости;
  - уменьшить площадь кристалла за счёт использования канавочной (trench) изоляции;
  - уменьшить паразитное взаимодействие между цифровой и аналоговой частями ИМС;
  - уменьшить эффект паразитного тока подложки, связанного с воздействием ионизирующего облучения;
  - увеличить стойкость к накопленной дозе до 1 Мрад и выше и устойчивость к воздействию ТЗЧ до уровня не ниже 60–80 МэВ·см<sup>2</sup>/мг [4–6].

**Особенности радиационно стойкого КНИ-биполярного техпроцесса**

Из особенностей основных, существующих в настоящее время КНИ-биполярных техпроцессов можно выделить метод формирования КНИ-изоляции: меза- и канавочная структура изоляции. Для КНИ-мезаструктуры скрытые слои формируются в n-подложке с концентрацией примеси, как в эпитаксиальном слое стандартного (не радиационно стойкого) техпроцесса, затем формируются мезаканавки, проводится их окисление и заполнение поликремнием (PolySi). Получившаяся

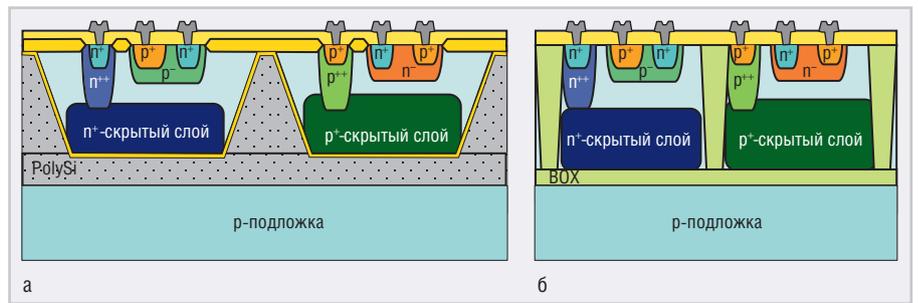


Рис. 1. Поперечное сечение p-n-p- и r-p-n-транзисторов: а) КНИ-мезаизоляция; б) КНИ-канавочная изоляция

ся структура «спекается» с подложкой носителем, после чего «лишний» слой p-подложки убирается шлифовкой.

Для КНИ-техпроцесса с канавочной изоляцией используются КНИ-подложки типа Unibond с достаточно толстым 2–5 мкм слоем приборного кремния, в котором формируются p<sup>+</sup>- и p<sup>+</sup>-скрытые слои. Далее выращивается эпитаксиальный слой, формируются диффузионные слои глубоких коллекторов p-n-p- и r-p-n-транзисторов. Формирование канавочной изоляции методом глубокого ПХ-травления обычно проводят после завершения всех необходимых высокотемпературных операций с температурой выше 1 000°С.

Финальная структура p-n-p- и r-p-n-транзисторов КНИ-биполярных техпроцессов представлена на рисунке 1.

В дополнение к отмеченным выше достоинствам КНИ-процесса можно добавить, что для КНИ-биполярного техпроцесса характерны более низкая ёмкость перехода «коллектор – подложка», отсутствие модуляции величины ёмкости этого перехода при изменении напряжения на коллекторе. Кроме того, отсутствует необходимость в дополнительном n-скрытом слое для изоляции вертикального p-n-p-транзистора.

**Особенности радиационно стойкого КНИ VCD-техпроцесса**

Наличие в библиотеке VCD-процесса вертикальных p-n-p- и r-p-n-биполярных транзисторов наряду с КМОП-, JFET-

и ДМОП-транзисторами (см. рис. 2) предполагает использование толстоплёночной КНИ-структуры со скрытыми слоями в приборном слое кремния.

Для КНИ VCD-техпроцесса используются КНИ-подложки типа Unibond с 1,5...2 мкм слоем приборного кремния, в котором формируются p<sup>+</sup>- и p<sup>+</sup>-скрытые слои. Затем выращивается эпитаксиальный слой, формируются диффузионные слои элементной базы и канавочная изоляция. Толстоплёночная КНИ-технология, используемая для VCD-техпроцесса, обладает отличной совместимостью с конструкцией большинства ИМС, изготовленных ранее по обычной радиационно стойкой VCD-технологии. Помимо этого её отличает простота добавления в техпроцесс возможностей для создания дополнительных элементов (транзисторов, резисторов и т.п.). Наличие скрытых слоёв и контакта с карманом в радиационно стойкой толстоплёночной КНИ-технологии позволяет:

- исключить эффект «плавающего тела» транзистора для обоих типов МОП-транзисторов;
- снизить коэффициент усиления паразитного биполярного транзистора в КМОП-структуре и тем самым увеличить стойкость этих транзисторов к воздействию одиночных ионизирующих частиц [7];
- значительно уменьшить эффект влияния радиационно-индуцированного заряда, захваченного в скрытом окси-

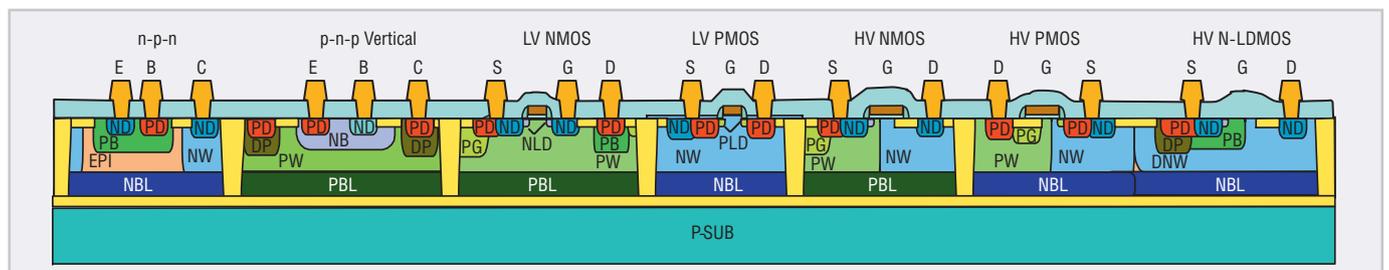


Рис. 2. Поперечное сечение основных транзисторов КНИ VCD-техпроцесса

Таблица 1. Основные электрические параметры ИМС для DC/DC-модулей

Параметр	Единица измерения	Норма	
		мин.	макс.
<b>ИМС ШИМ-контроллеров</b>			
Напряжение питания	В	–	30
Опорное напряжение	В	4,95...5,05	5,05...5,15
Нестабильность опорного напряжения по температуре	мВ/°С	–	0,4
Входное напряжение смещения усилителя ошибки	мВ	–	10
Напряжение обратной связи	В	2,45	2,55
Точность генератора частоты	кГц	47...360	57...440
Ток потребления	мА	–	17...33
<b>ИМС счетверённых операционных усилителей</b>			
Напряжение питания	В	3...4	14...32
Входное напряжение смещения	мкВ	–	700...5 000
Входной ток смещения	нА	–	30...35
Входной ток	нА	–	100...150
Ток потребления	мА	–	2,9...3,0
<b>ИМС программируемых стабилизаторов</b>			
Напряжение катода	В	2,5	36
Опорное напряжение	В	2,49...2,495	2,505...2,51
Нестабильность опорного напряжения по температуре	мВ	–	15...20
Минимальный рабочий ток катода	мА	–	0,4...1,0

Таблица 2. Основные электрические параметры ИМС конечных DC/DC-преобразователей СКТБ «Микроника»

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение	DMS1086		DMS1088		DMS1085		DMS4455	
		мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.	мин.	макс.
Напряжение питания, В	U <sub>CC</sub>	4,75	15,0	4,75	15,0	4,5	15,0	8,0	15,0
Выходное напряжение, В	U <sub>OUT</sub>	0,95	10,0	1,22	10,0	0,81	10,0	3,3	10,0
Выходной ток нагрузки, А	I <sub>L</sub>	–	2	–	3	–	1,2	–	5
Напряжение считывания обратной связи, В	U <sub>FB</sub>	0,90	0,95	1,184	1,258	0,79	0,83	0,79	0,83
Рабочая частота переключения, кГц	F <sub>SW</sub>	310	390	400	500	1 200	1 700	180	220
Ток потребления, мА	I <sub>CC</sub>	–	2	–	2	–	1	–	1,5
Ток потребления в выключенном состоянии, мкА	I <sub>SHDN</sub>	–	40	–	40	–	1	–	115
Сопротивление силовых транзисторов в открытом состоянии, мОм	R <sub>DS(ON)</sub>	85 (тип.)		80 (тип.)		350 (тип.)		50 (тип.)	
Коэффициент полезного действия U <sub>IN</sub> /U <sub>OUT</sub> = 12/5 В, %	I <sub>L</sub> (1А)	92 (тип.)		92 (тип.)		92 (0,8 А)		93 (тип.)	
	I <sub>L</sub> (МАХ)	85 (тип.)		85 (тип.)		88 (тип.)		85 (тип.)	

де, на электрические характеристики транзистора.

Для КМОП-транзисторов ключевыми особенностями техпроцесса и конструкции, увеличивающими стойкость к ДИ, являются:

- уменьшение толщины подзатворного оксида;
- уменьшение температуры отжига подзатворного оксида в атмосфере азота, которая не должна превышать 850–875°С [8, 9];
- использование альтернативного подзатворного диэлектрика – перекисленного азотированного оксида [10];
- использование конструкции n-МОП-транзисторов с N-затвором и охран-

ной областью р<sup>+</sup>-типа для предотвращения утечек между стоком и истоком вдоль границы бокового оксида, вызванных накоплением в нём положительного заряда в результате действия ДИ.

### Основные характеристики биполярных ИМС для DC/DC-модулей

В специализированных DC/DC-модулях систем вторичного электропитания и другой преобразовательной аппаратуре специального назначения в настоящее время в основном используются такие типы ИМС, как ШИМ-контроллеры, ОУ и компараторы, пре-

цизионные регулируемые стабилизаторы. Основные электрические параметры ИМС данных классов, используемых в DC/DC-модулях, приведены в таблице 1.

СКТБ «Микроника» в настоящее время осуществляет разработку как ИМС данных типов, так и DC/DC-модулей на их основе [11], предназначенных для космической и специальной аппаратуры. Для производства ИМС используется КНИ-биполярный техпроцесс со стойкостью к поглощённой дозе гамма-облучения не ниже 100 крад и устойчивостью к воздействию ТЗЧ не ниже 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг. Стойкость к ДИ достигается как технологическими методами, описанными выше, так и посредством специализированных схемотехнических решений в блоках ИМС.

### Основные характеристики VCD-микросхем конечных DC/DC-преобразователей

В последнее время наблюдается рост предложений продуктов для распределённых систем питания, которые в ряде применений обладают преимуществами перед централизованными системами питания:

- размещение конечных преобразователей PoL (Point of Load) DC/DC в непосредственной близости от потребителя энергии позволяет снизить мощность каждого из них, улучшить температурный режим и снизить помехи, возникающие в системе;
- использование относительно высоких уровней напряжений для питания конечных преобразователей PoL DC/DC при меньших токах снижает требования к диаметрам проводов, монтажу и повышает надёжность системы;
- система достаточно проста в разработке, легко расширяется и легко диагностируется.

Наряду с компаниями Texas Instruments и Linear Technology разработкой ИМС данного класса для космической электроники, основные электрические параметры которых приведены в таблице 2, занимается СКТБ «Микроника» [12]. Использование специального КНИ VCD-техпроцесса позволяет получать стойкость к поглощённой дозе гамма-облучения не ниже 100 крад и устойчивость к воздействию ТЗЧ не ниже 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полная диэлектрическая изоляция каждого отдельного элемента (тран-

зистора, резистора, конденсатора и пр.) в КНИ-технологиях позволяет полностью исключить эффект защёлки и токи утечки в подложку, уменьшить паразитные ёмкости и, таким образом, делает данные технологии наиболее пригодными для использования в производстве ИМС космической электроники. Хотя элементы в КНИ-технологиях существенно меньше по объёму в сравнении с традиционными технологиями, они могут быть чувствительны к воздействию одиночных ионизирующих частиц, что определяется главным образом паразитными электрическими структурами. Для уменьшения влияния этого фактора используются как технологические (специальные методы формирования подзатворного диэлектрика), так и конструктивные (охранные кольца, скрытые слои, Н-затвор) методы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Lacoe R.* CMOS scaling, design principles and hardening-by-design methodologies. 2003 IEEE NSREC. Short Course. Radiation effects in advanced commercial technologies: How design scaling has affected the selection of space borne electronics. July 2003. Monterey, California.
2. *Oldham T. R.* How device scaling affects single event effects sensitivity. 2003 IEEE NSREC. Short Course. Radiation effects in advanced commercial technologies: how design scaling has affected the selection of space borne electronics, July 2003. Monterey, California.
3. Каталог компании International Rectifier: [www.irf.com/product-info/datasheets/hire1/ml1000605d.pdf](http://www.irf.com/product-info/datasheets/hire1/ml1000605d.pdf)
4. Silicon On Insulator, Application Note 1107, Intersil Corp.: [www.soiconsortium.org/pdf/SOI\\_Implementation\\_WhitePaper\\_Infotech\\_v2.pdf](http://www.soiconsortium.org/pdf/SOI_Implementation_WhitePaper_Infotech_v2.pdf)
5. PR40 Process: 40V Complementary Bipolar Plus JFET (CBiFET) Process, Intersil Corp.: [www.intersil.com/en/products/pr40-adv-complementary-bipolar-process.html](http://www.intersil.com/en/products/pr40-adv-complementary-bipolar-process.html)
6. *Sharma A., Teverovsky A.* Reliability Evaluation of Fully Depleted SOI (FDSOI) Technology for Space Applications: [npp.nasa.gov/docuploads/f8b88988-9a2d-462b-986eb801f50978a9/eval\\_fdsoiparti\\_nppfinalreport.pdf](http://npp.nasa.gov/docuploads/f8b88988-9a2d-462b-986eb801f50978a9/eval_fdsoiparti_nppfinalreport.pdf)
7. *Musseau O.* SEU in SOI SRAMs-a static model / O. Musseau, J.L. Leray, V. Ferlet-Cavrois, Y.M. Coic, B. Giffard – IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, Vol. 41, Issue 3, p. 607–612.
8. *Токарев В.В., Тютюнников С.И.* Отчёт по результатам испытаний МОП-транзисторов на воздействие нуклонов. – ОИЯИ, лаборатория ФВЭ, г. Дубна, март 2013.
9. *Токарев В.В., Тютюнников С.И.* Отчёт по результатам предварительных испытаний полевых транзисторов на воздействие ТЗЧ на оборудовании ОИЯИ в июне 2014 г. – ОИЯИ, лаборатория ФВЭ, г. Дубна, июнь 2014.
10. *Schwank J.* Total Dose Effects in MOS Devices // Radiation Effects – From Particles to Payloads. IEEE NSREC Short Course, 2002. P. III-1 – III-123.
11. *Котов В., Цвелюк Е., Токарев В.* DC/DC-модули мощностью до 15 Вт для 27- и 100-вольтового бортового питания // Силовая электроника. – 2017.
12. *Рудаковский Д., Котов В., Битню Л.* Распределённая система электропитания на основе AC/DC- и DC/DC-преобразователей компании «Микроника» // Силовая электроника. – 2012. – № 6. – С. 8–11.



# PROCHIP

POWERED BY PROSOFT

## Активный компонент вашего бизнеса

- + Различные решения по подбору элементной базы
- + Осуществление поставок комплектующих для серийного производства и новых разработок
- + Поддержка склада
- + Оказание технической и информационной поддержки



+7 (495) 232-2522  
INFO@PROCHIP.RU  
WWW.PROCHIP.RU



Реклама

