

# Проектирование и разработка космических бортовых приборов, ориентированных на современную зарубежную электронную компонентную базу

Николай Данилин, Сергей Белослудцев (Москва)

**В статье представлена информация о методах аналитической оценки и практической отбраковки электронной компонентной базы индустриального уровня качества, предназначенной для использования в бортовых системах космических аппаратов, функционирующих в открытом космосе.**

В преддверии вступления России во Всемирную торговую организацию, а также учитывая возросшую конкуренцию со стороны иностранных компаний, разработчики и изготовители российской радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) предпочитают применять современную иностранную электронную компонентную базу (ЭКБ), в том числе интегральные микросхемы (ИМС).

К услугам западного рынка ЭКБ начала прибегать и космическая отрасль России. Создание современной космической техники характеризуется многономенклатурным, малообъёмным (до 100 шт. в год) применением электрорадиоизделий повышенного уровня качества с улучшенными техническими характеристиками, способных сохранять работоспособность в условиях воздействия факторов космического пространства в течение 15 – 20 лет. Электронная компонентная база относится к критически важным технологиям и

широко используется в радиоэлектронной аппаратуре космической техники (КТ), а также оказывает непосредственное влияние на её технический облик и темпы развития.

Качество и надёжность космической техники РФ определяется жёстким соблюдением положения по созданию космической техники, введённого в действие постановлением Правительства Российской Федерации от 22 июля 1998 г. РФ № 819-3, в котором большое внимание уделено комплектующей электронной компонентной базе.

Не вдаваясь в подробности причин создавшейся ситуации, подчеркнём, что применение в российской промышленности (включая космическую технику) западных компонентов часто является не только прогрессивным, но и единственно возможным в определённых ситуациях инженерно-техническим решением.

После того как принято решение о применении в аппаратуре, особенно

в КТ, зарубежной ЭКБ, встаёт вопрос о закупке этой ЭКБ соответствующего качества.

Наиболее высоким качеством характеризуются американские ИМС классов S и B, а также европейские ИМС классов B и C.

Надёжность ИМС наиболее высокого класса выше надёжности коммерческих ИМС примерно в 80...100 раз. Приблизительно таково же и различие в стоимости между ИМС космического и коммерческого применения.

Уровни качества европейских и американских ИМС, ориентированных на космическое, военное, индустриальное и коммерческое применение, обобщены и сведены в таблицу 1.

Последнее время в нашей стране и за рубежом наметилась тенденция к применению в РЭА космических систем элементов индустриального класса вместо дорогой и труднодоступной зарубежной ЭКБ космического класса после проведения широкой программы отбраковочных, сверхотбраковочных и диагностических испытаний на основе анализа методов неразрушающего контроля, а также конструкционного контроля и физического анализа представительных выборок ИМС от каждой партии.

Интенсивная процедура отбора позволяет существенно повысить ка-

Таблица 1. Уровни качества зарубежных ИМС

Уровень качества ( $\pi_Q$ )	Европейские ИМС	Американские ИМС
Космический, $\pi_Q \cong 0,25$	Уровень В (приёмочные испытания LAT1, LAT2, LAT3)	JANS QPL38510
		CLASS V QML38535
Военный, $\pi_Q \cong 1,0$	Уровень С (приёмочные испытания LAT1, LAT2, LAT3)	JANS QPL38510
		CLASS Q QML38535
Средний военный, $\pi_Q \cong 2,0$	Экспериментальный уровень (уровень С без приёмочных испытаний LAT1, LAT2, без записи данных и визуального контроля перед герметизацией)	SMD (38536 Class M). Производственная линия, соответствующая уровню качества В, испытания в соответствии с пар. 1.2.1 MIL-STD-883
Низший военный, $\pi_Q \cong 5,0$	Объём испытаний сокращён по сравнению с классами В и С стандарта ESA/SCC 9000	Объём испытаний сокращён по сравнению с классами S и B MIL-STD-883
Индустриальный, $\pi_Q \cong 10,0$	ИМС негерметичные с дополнительными температурными испытаниями: индустриальный температурный диапазон от -25 до +100°C	
Коммерческий, $\pi_Q \cong 20,0$	ИМС негерметичные без отбраковочных испытаний: коммерческий температурный диапазон от 0 до 80°C	

чество партий ИМС и в среднем в 10...30 раз снизить интенсивность отказов в партиях за счёт исключения из них ИМС со скрытыми дефектами.

Процедуры отбраковочных испытаний, ДНК, РФА достаточно хорошо отработаны и успешно применяются в РФ и за рубежом.

Так, например, в НЦ СЭО РНИИ КП (Москва), на фирмах IGG (Портсмут, Англия), Technolgica (Севилья, Испания) достаточно широко развита практика эффективного комплектования РЭА КА элементами, которые не имеют квалификации/сертификации классов ОС, ОСМ (РФ), В, С (Европа), S, В (США).

Таковыми элементами могут быть микросхемы промышленных классов, а также элементы более высокого качества, которые за рубежом получили название COTS (Commercial of the Shelf) и под которыми понимают неквалифицированную ЭКБ.

Основные преимущества использования промышленных ИС во вновь разрабатываемых электронных блоках связаны со следующими причинами:

- радиационно-стойкие ИС оперативно запоминающих устройств (ОЗУ) класс Sрасе имеют более чем на порядок меньшую информационную ёмкость;
- радиационно-стойкие ИС микропроцессоров класса Sрасе достигли уровня 286/386-процессоров, тогда как в промышленных изделиях от них уже практически отказались и ориентируются в основном на процессоры выше уровня Pentium;
- промышленные ИС имеют на 1...2 порядка меньшую стоимость;
- для промышленных ИС на рынке широко представлено разнообразное прикладное программное обеспечение;
- средства разработки и отладки изделий на основе промышленных ИС более доступны.

Для того чтобы применять ЭКБ COTS в РЭА КА, необходимо выполнить ряд дорогостоящих работ, среди которых необходимо выделить отбраковочные (сверхотбраковочные) испытания, индивидуальный диагностический неразрушающий контроль ЭКБ, РФА выборки из нескольких элементов от каждой партии. При этом, конечно, значительно повышается конечная стоимость элементов, но в то же время почти про-

порционально уменьшается интенсивность отказов (повышается надёжность) этих элементов.

Надёжность зарубежных элементов промышленного класса, прошедших дополнительные испытания (ДИ) в аттестованных испытательных центрах, нам представляется целесообразным оценивать на основе американского справочника MIL-HDBK-217, применяя эмпирические коэффициенты повышения качества партии за счёт ДИ.

Среди многочисленных факторов, влияющих на функционирование электронной аппаратуры при её эксплуатации, особое значение имеет воздействие полей ионизирующих излучений космического пространства (КП) – электронов, протонов и ионов. Широкое применение полупроводниковых изделий микроэлектроники в качестве элементной базы космических электронных систем сделало актуальной задачу оценки и прогнозирования уровней отказов элементов и узлов к радиационным воздействиям космического пространства. Традиционно обеспечение и прогнозирование радиационной стойкости интегральных схем (ИС) осуществляется на основе требований соответствующих нормативно-технических документов. Так, за рубежом этим целям служат стандарты США MIL-STD-883 и Европейского космического агентства ESA/SCC Basic Specification.

Рассмотрим в качестве примера расчётную оценку интенсивности отказов цифровых логических МОП интегральных микросхем среднего уровня интеграции. В общем случае для ИМС всех классов интенсивность отказов согласно MIL-HDB-217 вычисляется по формуле:

$$\lambda = \lambda_G \pi_Q,$$

$$\lambda_G = (C_1 \pi_T \pi_V + C_2 \pi_E) \pi_L \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1},$$

где  $\lambda_G$  – интенсивность отказов без учёта коэффициента качества  $\pi_Q$ ;  
 $C_1$  – коэффициент сложности ИС;  
 $C_1 = 0,04$  для количества вентилях в ИС от 1000 до 3000;  
 $\pi_T$  – температурный коэффициент;  
 $\pi_T = 1,1$  для температуры перехода, равной 50°C, для негерметичных корпусов КМОП ИС;  
 $\pi_V$  – коэффициент напряжения питания;  $\pi_V = 1$  для КМОП при  $U_{CC} < 12$  В и для всех других технологий, кроме КМОП;

$C_2$  – коэффициент корпуса; для негерметичных корпусов  $C_2 = 2 \times 10^{-4} (N_P)^{1,23}$ , где  $N_P$  – число внешних выводов;  $C_2 = 0,007$  для 18-выводной ИС;

$\pi_E$  – коэффициент влияния условий окружающей среды;  $\pi_E = 0,45$  для условий космического аппарата;

$\pi_L$  – коэффициент изученности;  $\pi_L = 1$  для серийной ЭКБ с устоявшейся технологией.

С учётом значений вышеуказанных коэффициентов:

$$\lambda_G = 0,0528 \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Коэффициент качества для ИС промышленного исполнения равен 10,0 (для сравнения отметим, что  $\pi_Q$  для ИС космического применения, т.е. класс S, равен 0,25).

Таким образом, окончательная интенсивность отказов для вышеуказанного подкласса ИС в промышленном исполнении:

$$\lambda = \lambda_G \pi_Q = 0,528 \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Ниже приводятся расчётные данные по интенсивности отказов ИМС промышленного применения в негерметичных корпусах для 11 наиболее распространённых классов ИМС.

### 1. Микросхемы биполярные и МОП цифровые промышленные в негерметичных корпусах

$$\lambda = (C_1 \pi_T \pi_V + C_2 \pi_E) \pi_L \pi_Q \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

$\pi_Q = 10$ ;  
 $C_1$  – коэффициент сложности ИС:  
 $C_1 = 0,01$  от 1 до 100 вентилях,  
 $C_1 = 0,02$  от 100 до 1000 вентилях,  
 $C_1 = 0,04$  от 1000 до 3000 вентилях,  
 $C_1 = 0,08$  от 3000 до 10000 вентилях;  
 $\pi_T$  – температурный коэффициент;  
 $\pi_T = 1,1$  для температуры перехода, равной 50°C, для негерметичных корпусов КМОП ИС;  
 $\pi_V$  – коэффициент напряжения питания;  $\pi_V = 1$  для КМОП при  $U_{CC} < 12$  В и для всех технологий, кроме КМОП;  
 $C_2$  – коэффициент корпуса; для негерметичных корпусов  $C_2 = 2 \times 10^{-4} (N_P)^{1,23}$ , где  $N_P$  – число внешних выводов;  
 $C_2 = 0,0051$  для 14 выводов,  
 $C_2 = 0,0061$  для 16 выводов,  
 $C_2 = 0,0070$  для 18 выводов,  
 $C_2 = 0,0100$  для 24 выводов;  
 $\pi_E$  – коэффициент влияния условий окружающей среды;  $\pi_E = 0,45$  для условий космического аппарата;

$\pi_L$  – коэффициент изученности;  $\pi_L = 1$  для серийных ЭРИ с устоявшейся технологией.

Результаты расчётов сведены в табл. 2 и 3.

**2. Монолитные биполярные и МОП линейные ИС**

$$\lambda = (C_1\pi_T\pi_V + C_2\pi_E)\pi_L\pi_Q \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Все коэффициенты полностью аналогичны приведённым в п. 1, кроме коэффициента  $C_1$ :

$C_1 = 0,01$  для числа транзисторов от 1 до 100,

$C_1 = 0,02$  для числа транзисторов от 100 до 300,

$C_1 = 0,04$  для числа транзисторов от 300 до 1000.

Результаты расчётов сведены в табл. 4.

**3. Монолитные биполярные и МОП цифровые микропроцессорные интегральные схемы (негерметичные, КМОП)**

$$\lambda = (C_1\pi_T\pi_V + C_2\pi_E)\pi_L\pi_Q \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Все коэффициенты полностью аналогичны приведённым в п. 1, кроме коэффициента  $C_1$ :

$C_1 = 0,03$  для 8-разрядных микропроцессоров,

$C_1 = 0,06$  для 16-разрядных микропроцессоров,

$C_1 = 0,12$  для 32-разрядных микропроцессоров.

Результаты расчётов сведены в табл. 5.

**4. Монолитные биполярные и МОП БИС ОЗУ**

$$\lambda = (C_1\pi_T\pi_V + C_2\pi_E)\pi_L\pi_Q \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Все коэффициенты полностью аналогичны описанным в п. 1, кроме коэффициента  $C_1$ :

$C_1 = 0,025$  для динамических МОП ОЗУ до 16К,

$C_1 = 0,05$  для динамических МОП ОЗУ от 16К до 64К,

$C_1 = 0,1$  для динамических МОП ОЗУ от 64К до 256К,

$C_1 = 0,2$  для динамических МОП ОЗУ от 256К до 1М,

$C_1 = 0,05$  для статических МОП ОЗУ до 4К,

$C_1 = 0,1$  для статических МОП ОЗУ от 4К до 16К,

$C_1 = 0,2$  для статических МОП ОЗУ от 16К до 64К,

$C_1 = 0,4$  для динамических МОП ОЗУ от 64К до 256К,

$C_1 = 0,05$  для статических биполярных ОЗУ до 4К,

$C_1 = 0,1$  для статических биполярных ОЗУ от 4К до 16К.

Результаты расчётов сведены в табл. 6, 7 и 8.

**5. БИС ПЗУ (ROM) и программируемых ПЗУ (PROM), включая PROM с пережигаемыми перемычками, PROM с ультрафиолетовым стиранием, электрическим стиранием (EEPROM) и электрически изменяемых (EAPROM) ПЗУ**

$$\lambda = (C_1\pi_T\pi_V + C_2\pi_E)\pi_L\pi_Q \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Все коэффициенты полностью аналогичны описанным в п. 1, кроме коэффициента  $C_1$ :

$C_1 = 0,035$  для МОП ПЗУ до 16К,

$C_1 = 0,07$  для МОП ПЗУ от 16К до 64К,

**Таблица 8. Интенсивность отказов биполярных ОЗУ в негерметичных корпусах**

Объём памяти	$\lambda$
≤4К	0,309
>16К...64К	0,596

**Таблица 2. Интенсивность отказов биполярных и МОП цифровых микросхем в негерметичных корпусах**

Число вентиляей	Технология	$\lambda$
1 – 100	Биполярная	0,080
	МОП	0,138
>100 – 1000	Биполярная	0,150
	МОП	0,267
>1000 – 3000	Биполярная	0,293
	МОП	0,528
>3000 – 10 000	Биполярная	0,770
	МОП	1,240
>10000 – 30 000	Биполярная	1,372
	МОП	2,312

**Таблица 3. Интенсивность отказов программируемых логических матриц в негерметичных корпусах**

Число вентиляей	Технология	$\lambda$
1 – 100	Биполярная	0,341
	МОП	0,694
>100 – 1000	Биполярная	0,673
	МОП	1,378
>1000 – 3000	Биполярная	1,340
	МОП	2,750

**Таблица 4. Интенсивность отказов биполярных и МОП линейных (аналоговых) микросхем в негерметичных корпусах**

Число вентиляей	Технология	$\lambda$
1 – 100	Биполярная	0,173
	МОП	
>100 – 1000	Биполярная	0,332
	МОП	
>1000 – 3000	Биполярная	0,645
	МОП	

**Таблица 5. Интенсивность отказов биполярных и МОП цифровых микропроцессоров в негерметичных корпусах**

Число вентиляей	Технология	$\lambda$
8	Биполярная	0,241
	МОП	0,417
16	Биполярная	0,464
	МОП	0,816
32	Биполярная	0,980
	МОП	1,685

**Таблица 6. Интенсивность отказов динамических МОП ОЗУ в негерметичных корпусах**

Объём памяти	$\lambda$
≤16К	0,309
>16К...64К	0,596
>64К...256К	1,156
>256К...1М	2,274

**Таблица 7. Интенсивность отказов статических МОП ОЗУ в негерметичных корпусах**

Объём памяти	$\lambda$
≤16К	0,587
>16К...64К	1,142
>64К...256К	2,262
>256К...1М	4,488

$C_1 = 0,14$  для МОП ПЗУ от 64К до 256К,  
 $C_1 = 0,28$  для МОП ПЗУ от 256К до 1М,  
 $C_1 = 0,06$  для МОП UVE PROM, EEPROM, EAPROM ПЗУ до 16К,  
 $C_1 = 0,12$  для МОП UVE PROM, EEPROM, EAPROM ПЗУ от 16К до 64К,  
 $C_1 = 0,24$  для МОП UVE PROM, EEPROM, EAPROM ПЗУ от 64К до 256К,  
 $C_1 = 0,48$  для МОП UVE PROM, EEPROM, EAPROM ПЗУ от 256К до 1М,  
 $C_1 = 0,06$  для ПЗУ с пережигаемыми перемычками до 16К,  
 $C_1 = 0,12$  для ПЗУ с пережигаемыми перемычками от 16К до 64К.  
 Результаты расчётов сведены в табл. 9, 10 и 11.

**6. Монолитные биполярные и МОП аналоговые микропроцессорные БИС**

$$\lambda = 1,24(C_1\pi_T\pi_V + C_2\pi_E)\pi_I\pi_Q \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Все коэффициенты полностью аналогичны описанным в п. 1, кроме коэффициента  $C_1$ .

Для сигнальных процессоров с рядностью до 16  $C_1 = 0,06$ .

Результаты расчётов сведены в табл. 12.

Улучшение приведённых выше интенсивностей отказов  $\lambda$  в разумных пределах может быть достигнуто проведением дополнительных испытаний партии ИС.

Для негерметичных промышленных микросхем всех классов и типов коэффициент качества  $\pi_Q = 10$  (коммерческие ИМС имеют коэффициент качества порядка 20). Негерметичные микросхемы промышленного применения можно довести до уровня качества, соответствующего военной технике ( $\pi_Q = 1$ , но не выше), применяя комплекс технически обоснованных дополнительных отбраковочных испытаний, включая методы дополнительного неразрушающего контроля (ДНК), для всех без исключения микросхем, комплектующих аппаратуру (табл. 13).

Улучшение коэффициента качества, достигнутое за счёт введения 100% отбраковочных испытаний с применением методов ДНК, составляет таким образом:

$$K_Q = 1,9 \times 1,7 \times 2,0 \times 1,6 = 10,34,$$

$$\pi_Q' = \pi_Q / K_Q = 10 / 10,34 \approx 1,$$

где  $\pi_Q'$  – результирующий коэффициент качества, достигнутый за счёт

проведения вышеуказанных мероприятий.

Таким образом, применив к промышленным компонентам дополнительные отбраковочные испытания в объёме, показанном на предыдущей странице, можно на порядок уменьшить величины интенсивностей отказов, приведённых в таблицах 2 – 12. Примером может служить информация по разработке зарубежного новейшего ретранслятора, представленная в таблице 14.

Зарубежные специалисты в области обеспечения качества компонентов для космической техники считают, что применение неквалифицированных (например, промышленных) компонентов в космических программах вызвано не стремлением сэкономить средства, а вынужденными обстоятельствами, связанными с отсутствием на данный момент на рынке компонентов необходимого типа.

Работы по доведению промышленного компонента до уровня космического требуют высоких денежных и временных затрат.

Поскольку у промышленных ИМС нельзя проследить жизненный цикл и отсутствуют регулярные данные заводов-изготовителей по их качеству, по отказам на различных стадиях производства и применения,

**Таблица 9. Интенсивность отказов МОП ПЗУ в негерметичных корпусах**

Объём памяти	$\lambda$
$\leq 16\text{К}$	0,434
$>16\text{К}...64\text{К}$	0,832
$>64\text{К}...256\text{К}$	1,609
$>256\text{К}...1\text{М}$	3,194

**Таблица 10. Интенсивность отказов МОП ПЗУ (VVEPROM, EEPROM, EAPROM) в негерметичных корпусах**

Объём памяти	$\lambda$
$\leq 16\text{К}$	0,711
$>16\text{К}...64\text{К}$	1,387
$>64\text{К}...256\text{К}$	2,720
$>256\text{К}...1\text{М}$	5,416

**Таблица 11. Интенсивность отказов биполярных ПЗУ и ПЗУ с пережигаемыми перемычками в негерметичных корпусах**

Объём памяти	$\lambda$
$\leq 16\text{К}$	0,358
$>16\text{К}...64\text{К}$	0,681

по возможным изменениям технологического процесса изготовления, каждая партия ИМС промышленного уровня качества должна подвергаться определённым дополнительным испытаниям (например, в соответствии с табл. 13), а выборки от каждой партии должны подвергаться конструкционному анализу или РФА.

**Таблица 12. Интенсивность отказов биполярных или МОП аналоговых микропроцессорных устройств в негерметичных корпусах в промышленном исполнении**

Число разрядов	Технология	$\lambda$
$\leq 16\text{К}$	Биполярная	0,575
	МОП	1,012

**Таблица 13. Дополнительные испытания для микросхем. Улучшение качества партий ЭКБ за счёт отбраковки**

Рекомендуемые дополнительные испытания для микросхем	Ожидаемое улучшение качества
Измерения электрических параметров по ужесточённым нормам для нормальной, положительной и отрицательной температур	В 1,9 раз
Проведения 10 термоциклов с измерением электрических параметров	В 1,7 раз
Осуществление электротермотренировки (ЭТТ) при максимальной рабочей для данной ИС температуре	В 2,0 раза
Измерение информационных параметров до и после ЭТТ	В 1,6 раза
Общее улучшение коэффициента качества: $1,9 \times 1,7 \times 2,0 \times 1,6$	В 10,34 раза

**Таблица 14. Характеристики новейшего зарубежного бортового ретранслятора, разработанного с применением сертифицированной ЭКБ**

Наименование	Требования заказчика	Полученные результаты с применением сертифицированной ЭКБ
Масса, кг	Не более 400	207
Потребляемая мощность, Вт	Не более 1400	Не более 800
Срок активного существования (САС), лет	Не менее 5	Не менее 12

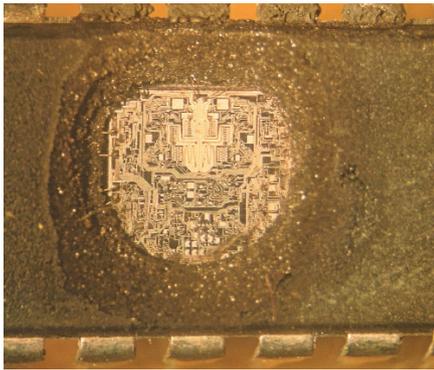


Рис. 1. Локальное вскрытие пластмассового DIP-корпуса для последующего анализа кристалла ИС, увеличение в 15 раз

Дополнительные испытания должны учитывать функциональные, конструктивные, технологические особенности ИМС и условия её предполагаемого применения.

За рубежом абсолютная дополнительная стоимость доведения компонента до более высокого уровня качества при наличии необходимого оборудования и согласованных программ испытаний в основном определяется временными затратами, которые, в свою очередь, пропорциональны заработной плате квалифицированных сотрудников – специалистов по элементной базе. Поэтому на Западе скептически говорят о возможной экономии затрат при начальной ориентировке на элементную базу промышленного или коммерческого уровня качества.

Что касается положения на российском рынке космических компонентов, то тяга разработчиков к зарубежной элементной базе промышленного уровня объясняется не только её широкими функциональными возможностями, но и существенно более низкими затратами на дополнительные отбраковочные, квалификационные (сертификационные) испытания, определяемые средней реальной заработной платой российских специалистов.

Поэтому тенденция к применению в космической аппаратуре зарубежной промышленной ЭКБ, особенно ИМС высокого уровня интеграции с последующим обязательным проведением определённого комплекса дополнительных испытаний и процедур сохранится, на наш взгляд, ещё длительное время.

Имеется важное обстоятельство, связанное с отставанием функцио-

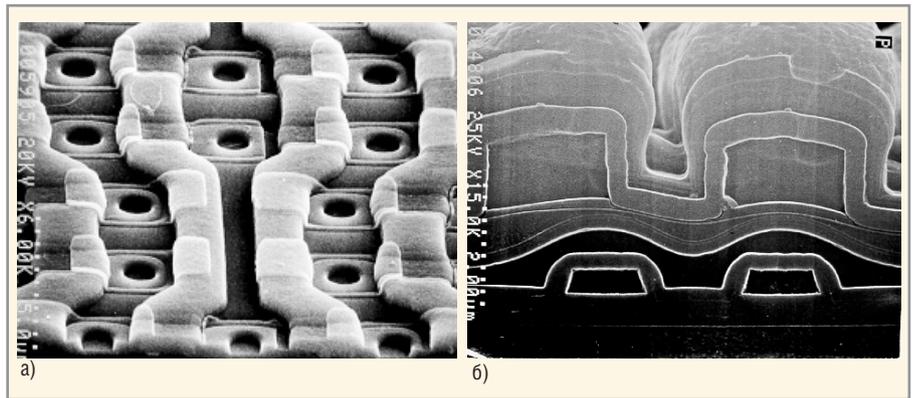


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности (а) и поперечного сечения (увеличение 6000х), (б) кристалла ИМС (увеличение 15 000х)

нальной сложности радиационно-стойких изделий микроэлектроники от ИС, выпускаемых в промышленных целях по современным технологиям. Использование новейших технологий позволяет существенно увеличить эффективность информационно-управляющих систем КА. К тому же средства разработки и отладки для промышленных ИС более широко представлены на рынке электронной продукции. Дополнительным фактором служит то, что ряд промышленных технологий, например кремний на изоляторе (КНИ), потенциально может иметь высокие показатели радиационной стойкости по ряду доминирующих радиационных эффектов. При этом следует также иметь в виду, что введённая в эксплуатацию электронная система должна функционировать в течение продолжительного срока, поэтому может оказаться, что к моменту запуска промышленных ИС, на основе которых построена электронная аппаратура КА, сняты с производства. Эти тенденции имеют место в рамках глобального процесса развития технологий изготовления ИС и проявляются через:

- уменьшение размеров отдельных компонентов ИС;
- увеличение быстродействия ИС;
- переход на более низкие уровни напряжений питания и потребляемой мощности.

Однако использование промышленных ИС в КА несёт определённый риск, связанный со следующими факторами:

- ряд промышленных ИС неприменим для условий эксплуатации в космосе, другими словами, не гарантируется их работа при воздействии радиации в широком диапа-

зоне температур, в условиях вакуума и т.д.;

- большинство промышленных ИС имеют уровень функциональных отказов порядка 10 крад по суммарной поглощённой дозе;
- стойкость ИС не контролируется от партии к партии, а разброс может составлять более порядка;
- надёжность промышленных ИС в экспериментальных условиях эксплуатации неопределённая;
- в процессе разработки промышленных ИС не контролируются паразитные структуры, которые очень часто определяют порог радиационных отказов ИС;
- новые поколения промышленных ИС появляются каждые 6 – 18 месяцев, что требует создания некоторого резерва к моменту запуска КА.

Вследствие этого приходится для промышленных ИС разрабатывать специальные процедуры входного и выходного контроля, а также в ряде случаев проводить дополнительные сертификационные испытания (табл. 13).

Тем не менее, надо иметь в виду, что в связи с высокими требованиями САС (15 – 20 лет) в практике ведущих западных космических фирм в соответствии с жёсткими требованиями заказчиков при комплектации БА применяется всё-таки ЭКБ в основном космического уровня качества Space. В крайнем случае возможно применение ЭКБ, специально разработанной и изготовленной по требованиям стандартов для уровня Space или отбракованной по процедурам Upscreening из элементов уровня MIL. Таким комплектующим присваивается статус «нестандартных». При этом широко используется разрушающий

физический анализ (см. рис. 1 и 2). На рисунке 2 представлен пример использования растрового электронного микроскопа (РЭМ).

ЭКБ уровня Space и MIL наиболее дорогие, их стоимость в 10...100 раз выше, чем у промышленных, номенклатура и объём производства значительно уже промышленных, сроки поставок более длительные (20 – 25 недель). На них в первую очередь распространяются экспортные ограничения, создаваемые государственными институтами.

Однако ЭКБ уровня Space позволяет реализовать мощную избыточность по качеству (10 – 20 раз) и создать реальный резерв противодействия спектру внешних факторов: от космического пространства (стойкость 100 крад) до влияния статического электричества при сборке.

Другими словами, *наивысшее качество и надёжность компонентов всегда приводят к наименьшей общей стоимости проекта (отсутствие рекламаций, отказов, сбоев).*

В настоящее время достигнутая технологическая норма составляет около 0,1 мкм. В ближайшее время планируется получить норму не более 0,05 мкм. Практически все современные тенденции по применению функционально-сложных изделий микроэлектроники приводят к увеличению чувствительности ИС к воздействию радиации.

Таким образом, на современном этапе прогноз уровней радиационной стойкости ИС должен учитывать рост качественных показателей радиационно-стойкого технологического процесса, который имеет тенденцию к уменьшению производства и потенциальной возможности широкого использования ИС, изготовленных по промышленной технологии, с возможностью последующего увеличения качества при разработке их радиационно-стойких аналогов.

В настоящее время при проектировании и разработке электронной аппаратуры КА требуется от 2 до 5 лет с момента выбора элементной базы (базовой технологии) до запуска КА.

Электронная компонентная элементная база должна быть выбрана на ранней стадии разрабатываемой космической программы для того, чтобы иметь достаточное время для проведения входного контроля и сертификационных испытаний ИС, разработки узлов и блоков электронной аппаратуры, проведения испытаний электронных узлов и интегрирования всех объектов в космический аппарат.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Урличич Ю.М., Данилин Н.С., Чернов Д.А., Саинов А.А., Белослудцев С.А., Степанов А.А. Дополнительные отбраковочные испытания современной космической электронной компонентной базы. Современная электроника. 2007. № 2.
2. Данилин Н.С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских космических телекоммуникаций. М.: РТА ГТК, 2000.
3. Данилин Н.С., Белослудцев С.А. Стратегия обеспечения качества современной электронной компонентной базы новых российских космических разработок. М.: МАКС Пресс, 2007.



# ЭНЕРГИЯ КОСМОСА!

Радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи Interpoint

- Многообразие вариантов конструктивного исполнения
- Рабочий диапазон температур от -55 до +125°C
- Высокая радиационная стойкость до 300 крад
- Удельная мощность свыше 5000 Вт/дм<sup>3</sup>
- Выходная мощность от 1,5 до 100 Вт
- Входные напряжения: 16...40 В и 160...400 В постоянного тока
- Выходные напряжения: 1,5; 2,5; 3,3; 5; 12; 15; ±5; ±12; ±15; +5/±12; +5/±15 В
- Выходной контроль по MIL-STD-883 и MIL-PRF-38534

**ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР В РОССИИ И СТРАНАХ СНГ**

**МОСКВА** Тел.: (495) 234-0636 • Факс: (495) 234-0640 • E-mail: info@prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru  
**С.-ПЕТЕРБУРГ** Телефон: (812) 448-0444 • Факс: (812) 448-0339 • E-mail: info@spb.prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru  
**САМАРА** Телефон: (846) 277-9166 • Факс: (846) 277-9165 • E-mail: info@samara.prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru  
**НОВОСИБИРСК** Телефон: (383) 202-0960; 335-7001; 335-7002 • E-mail: info@nsk.prosoft.ru • Web: www.prosoft.ru  
**КИЕВ** Телефон (+380-44) 206-2343; 206-2478; 206-2496 • Факс: (+380-44) 206-2343 • E-mail info@prosoft-ua.com • Web: www.prosoft.ru

Реклама