

ПОСТРАДИАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ В ИС

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИС

В. Попов

Совершенно очевидно, что микросхемы бортовых устройств космических аппаратов должны быть высоконадежны. Однако под воздействием ионизирующего излучения происходит накопление заряда на макродефектах оксидной пленки планарных микроэлектронных структур, что приводит к изменению основных параметров ИС и их отказу. В целях решения этой актуальной проблемы проведены исследования связанного с макродефектами пострадиационного эффекта и на основании полученных результатов даны рекомендации по отбраковке ИС и прогнозированию их надежности.

Надежность ИС в значительной мере определяется качеством оксидной пленки, одной из основных характеристик которого является плотность дефектов. При этом различают дефекты точечные и крупные – макродефекты, соизмеримые с толщиной оксидной пленки (микропоры, разупорядоченные области и т.п.). Представляя собой в подавляющем большинстве центры захвата дырок, макродефекты наиболее сильно проявляются при накоплении в них заряда. Поскольку ИС находят широкое применение в бортовых устройствах космических аппаратов, где они работают при комплексном воздействии электрического поля, температуры и низкоинтенсивного ионизирующего излучения космического пространства, исследование дефектности оксидных пленок (как пассивирующих, так и подзатворных) весьма актуально.

ПОСТРАДИАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ В ИС

Для низкоинтенсивного ионизирующего излучения характерно протекание под его воздействием в объеме оксидных пленок двух процессов с соизмеримыми скоростями. Это – захват на уровни дефектов дырок, образовавшихся в результате ионизации диэлектрика, и процесс термического выброса дырок с этих уровней. Освобожденные дырки, перемещаясь в пленке диоксида кремния, могут быть захвачены на уровни напряженных валентных связей между атомами на границе раздела с кремнием или на уровни макродефектов. В первом случае происходит образование поверхностных состояний [1], а во втором – образование области диоксида кремния с высо-

кой плотностью положительного заряда [2]. Это наблюдается после ионизации диэлектрика через некоторое время, необходимое для освобождения захваченных дырок и их перемещения. Поэтому данный процесс получил название “пострадиационный эффект” (ПРЭ).

При исследовании ПРЭ для ускорения его проявления обычно используют выдержку облученных ионизирующим излучением планарных структур при повышенной температуре, а в ряде случаев – еще и в электрическом режиме. Такой метод испытания ИС при температурах 100–120°C вошел в декабре 1997 г. в военный стандарт США MIL-STD-883 как метод 1019.5. В нашей стране метод облучения и последующей термообработки получил название “радиационно-термическая обработка” (РТО). Применение подобных методов повышает скорость термического выброса дырок с уровней точечных дефектов и скорость их перемещения либо к макродефекту, либо к границе раздела диоксид кремния–кремний.

Интересны разные варианты проявления ПРЭ в МОП-транзисторах с *n*-каналом. Как видно из рис. 1, в период облучения происходит дрейф порогового напряжения затвора от значения перед облучением $U_{30}(0)$ до значения после облучения $U_{30}(D)$. В случае накопления заряда в макродефектах при термообработке дрейф продолжается в том же направлении, что и при облучении (кривая 1) [3]. При образовании поверхностных состояний, которые в *n*-канальном транзисторе заряжены отрицательно, дрейф напряжения в период термообработки следует в направлении, противоположном радиационному дрейфу, до уровня, превышающего пороговое напряжение до облучения (кривая 2). Этот эффект в литературе получил название “rebound” [4]. Он наблюдается также при больших дозах облучения, когда отрицательный заряд в поверхностных состояниях превышает положительный заряд в объеме диоксида кремния. В случае же отсутствия ПРЭ происходит восстановление (полное или частичное) значения порогового напряжения (кривая 3). Таким образом, макродефекты в МОП-транзисторе проявляются в продолжающемся после облучения (некоторой дозой *D*) процессе накопления в них положительного заряда, освобождающегося из точечных дефектов оксидной пленки.

В биполярных ИС процесс зарядки макродефектов, расположенных в пассивирующей оксидной пленке над *p*-*n*-переходом, приводит к увеличению обратного тока и, как следствие, к изменению парамет-

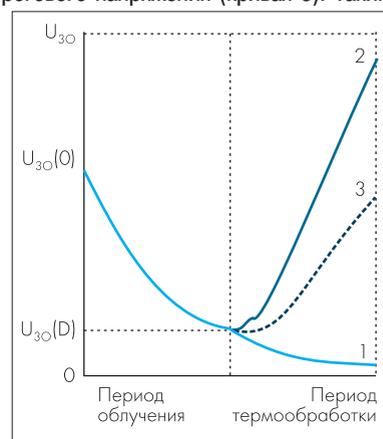


Рис. 1. Изменение порогового значения напряжения на затворе в МОП-транзисторе с *n*-каналом

Представляем автора статьи

ПОПОВ Виктор Дмитриевич. Доктор технических наук. Профессор кафедры “Микроэлектроника” МИФИ. Автор свыше 200 научных работ. Сфера профессиональных интересов – надежность ИС при радиационном воздействии. Контактный тел.: 323-9068. e-mail: wdpopov@mail.ru

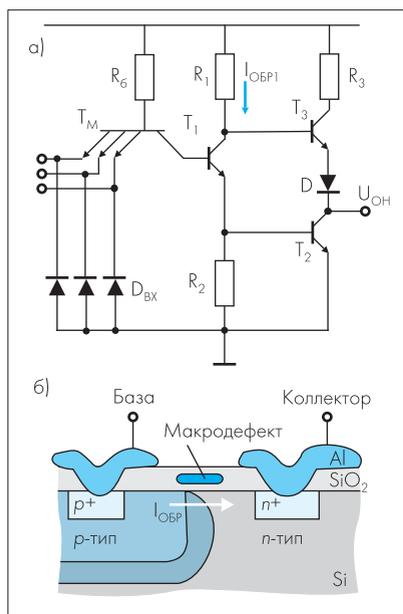


Рис.2. Логический ТТЛ-элемент:
а) – Принципиальная схема;
б) – Фрагмент структуры

всех (отказавших и работоспособных) ИС в течение 182 ч в номинальном электрическом режиме при температуре 40°C. Здесь проявился ПРЭ – произошел отказ шести ИС, которые не отказали во время облучения и выдержки в пассивном режиме. Такой результат обусловлен снижением выходного напряжения логической единицы U_{OH} и объясняется процессом зарядки макродефекта над p/n -пере-

ров микросхемы. В экспериментальном исследовании [5] использовалась выборка в 70 шт. биполярных ИС малой степени интеграции, содержащих по 3 ТТЛ-элемента типа 3И-НЕ. Принципиальная схема логического элемента приведена на рис.2а. Облучение гамма-лучами от источника Cs^{137} в пассивном режиме (напряжение не подается, все выводы ИС закорочены) привело к отказу 62 изделий. При выдержке в том же режиме в течение 97 ч при температуре 17°C восстановили работоспособность три микросхемы. Далее проводилась выдержка

ходом коллектора биполярного транзистора (рис.2б). Это вызвало обогащение свободными электронами приповерхностной области кремния n -типа и, как следствие, сужение обедненной области у поверхности полупроводника до туннельно проникаемой ширины, что и привело к росту обратного тока $I_{обр}$.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОДЕФКТОВ В ОКСИДНЫХ ПЛЕНКАХ

При исследовании макродефектов в пленках диоксида кремния использовался метод неразрушающего измерения напряжения пробоя диэлектрика [6]. В отличие от широко применяемых методов измерения термостимулированных токов и вольт-фарадных характеристик, которые определяют плотность заряда в диэлектрике, усредненную по площади тестовой МОП-структуры, в данном методе определяющую роль играет максимальная локальная плотность заряда. Если часть площади тестовой МОП-структуры занята заряженным макродефектом, то именно его заряд будет определять напряжение пробоя. Типичное распределение тестовых МОП-структур по напряженности электрического поля в диэлектрике $E = U_{пр}/d_{ок}$ ($U_{пр}$ – напряжение пробоя, $d_{ок}$ – толщина пленки диоксида кремния), при которой возникает пробой, показано на рис.3. Наименьшее напряжение пробоя диэлектрика – у структур с макродефектами, а наибольшее – у бездефектных структур. Промежуточное положение занимают МОП-структуры с точечными дефектами. Плотность макродефектов оксидной пленки может быть определена с использованием соотношения Больцмана [7]:

$$p = \exp(-N_M S), \quad (1)$$

где p – вероятность отсутствия пробоя, N_M – плотность заряженных макродефектов, S – площадь МОП-структуры.

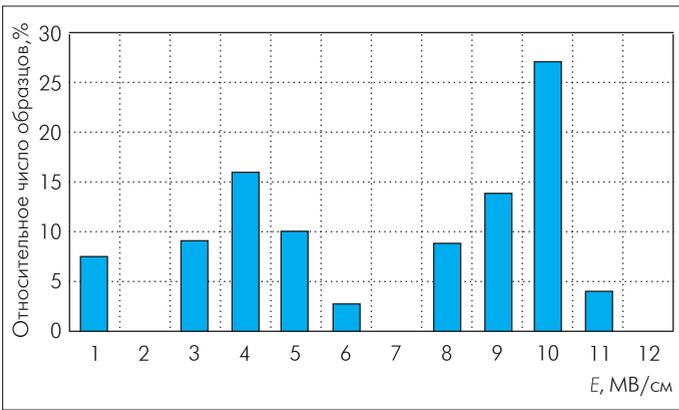


Рис.3. Распределение МОП-структур по напряженности электрического поля, при которой возникает пробой диэлектрика

В процессе изготовления ИС большинство дефектов (как точечных, так и макродефектов) не заряжаются и себя не проявляют. Поэтому для их обнаружения необходима радиационно-термическая обработка, после которой наблюдается увеличение числа МОП-структур с низким значением напряжения пробоя. В соответствии с выражением (1) рост плотности заряженных макродефектов N_M приводит к снижению ρ . Данные таблицы показывают, что облучение ионизирующим излучением вызывает зарядку только части макродефектов [2]. Дальнейший рост N_M наблюдается при низкотемпературной обработке после облучения. Как можно видеть, плотность макродефектов в данном случае составляет $N_M \approx 30 \text{ см}^{-2}$.

Используя выражение для расчета напряжения пробоя МОП-структуры [6] $U_{пр} = d_{ок} (E_i - Q_{ок}/\epsilon_{ок})$, где E_i – напряженность электрического поля при пробое идеальной структуры, $Q_{ок}$ – плотность заряда, $\epsilon_{ок}$ – диэлектрическая проницаемость диоксида кремния, можно оценить плотность точечных дефектов в макродефекте как $N_T = Q_{ок}/q$ (где q – заряд электрона). По данным [6], $N_T \approx 10^{13} \text{ см}^{-2}$, т.е. имеем фактически разупорядоченную область.

Изменение плотности заряженных макродефектов при РТО

Параметр измерения	До облучения	После облучения	После термообработки	
			1-й этап	2-й этап
$T, \text{ }^\circ\text{C}$	20	20	145	200
$D, \text{ крад}$	0	10	–	–
$t, \text{ мин}$	–	–	25	25
$N_M, \text{ см}^{-2}$	2,6	9,9	18,6	26,5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИС ПРИ РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Облучение и последующая термообработка ИС используется для моделирования низкоинтенсивного воздействия ионизирующего излучения. В условиях эксплуатации при низкой мощности дозы облучение оксидной пленки и накопление заряда в макродефектах происходят одновременно. Кроме того, возможен, например, выход космического аппарата за пределы радиационных поясов Земли и, следовательно, значительное снижение мощности дозы ионизирующего излучения. В обоих случаях ПРЭ приводит к появлению “ранних” отказов ИС, т.е. возникает “период приработки”. Как показано в работе [8], увеличение плотности заряженных макродефектов при низкоинтенсивном воздействии ионизирующего излучения можно описать выражением

$$N_M(t, P, T) = N_M(0) + K_Q P t \exp[(E_{aQ}/k)(1/T_0 - 1/T_3)], \quad (2)$$

где $N_M(0)$ – начальная плотность заряженных макродефектов, K_Q – параметр модели, P – мощность дозы ионизирующего излучения, t

– время облучения, E_{aQ} – энергия активации процесса накопления заряда в макродефектах, T_0 и T_3 – нормальная температура и температура при эксплуатации ИС, соответственно. Были определены следующие значения параметров модели (2) [8]:

$$K_Q = 1,037 \cdot 10^{-3} \text{ рад}^{-1} \text{ см}^{-2},$$

$$E_{aQ} = 0,055 \text{ эВ}.$$

Используя (1), (2) и известное в теории надежности соотношение

$$\rho = \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

в котором λ – интенсивность отказов ИС, можно получить выражение для интенсивности отказов, обусловленных накоплением заряда в макродефектах при низкоинтенсивном облучении:

$$\lambda_Q = N_M(0) S / t + K_Q S P \exp[(E_{aQ}/k)(1/T_0 - 1/T_3)].$$

В этом выражении первое слагаемое описывает так называемый период приработки, когда ИС отказывают из-за макродефектов, зарядившихся в процессе изготовления. Будем рассматривать только второе слагаемое, которое характеризует период нормальной работы ИС, в течение которого интенсивность отказов практически постоянна. Из представленных выше значений параметров модели (2) можно оценить интенсивность отказов, вызванных накоплением заряда в макродефектах в период нормальной работы, λ_Q . Тогда вероятность безотказной работы ИС с учетом процесса зарядки макродефектов будет определяться выражением (3), где $\lambda = \lambda_0 + \lambda_Q$, а λ_0 – справочная интенсивность отказов.

Если в случае эксплуатации космического аппарата на геостационарной орбите внутри приборного отсека мощность дозы ионизирующего излучения составляет $P = 0,118 \text{ рад/ч}$, то при $T_3 = 40^\circ\text{C}$ и $\lambda_0 = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ вероятность безотказной работы в течение пяти лет непрерывного функционирования получается равной

$$\text{при учете только } \lambda_0 : p_1 = 0,99956,$$

$$\text{при учете } \lambda_0 \text{ и } \lambda_Q : p_2 = 0,66513.$$

Приведенный пример показывает недопустимость применения ИС с макродефектами в космической технике. Для повышения надежности бортовой микроэлектронной аппаратуры необходима отбраковка потенциально ненадежных микросхем.

ОТБРАКОВКА ИС С МАКРОДЕФЕКТАМИ

Как показали исследования, широко применяемая для отбраковки ненадежных ИС электротермотренировка не приводит к зарядке макродефектов, не зарядившихся в процессе изготовления, и, следовательно, к их обнаружению. Они выявляются только при использовании РТО.

Применение РТО в процессе производства КМОП ИС дает возможность не только отбраковывать микросхемы с макродефектами в оксидных пленках, но и повышать процент выхода годных изделий на пластине [9]. Поскольку на заводе-изготовителе РТО проводится на пластинах, термообработку можно проводить в течение 30–60 мин при температурах 400–470°C. Ускоренные испытания микросхем, помещенных в корпус после РТО, показали их высокую надежность [9].

Разработчики аппаратуры получают микросхемы в корпусах, что снижает температуру термообработки после облучения до 100–125°C. Исследования показали [10], что в этом случае требуется длительный (~500 ч) отжиг в пассивном режиме. Эффект от РТО заключается в разделении партии ИС на группы, характеризующиеся определенным уровнем дефектности оксидных пленок. На рис.4а [11] представлены результаты измерения параметра-критерия U_{0L} (выходное напряжение логического нуля) в партии КМОП

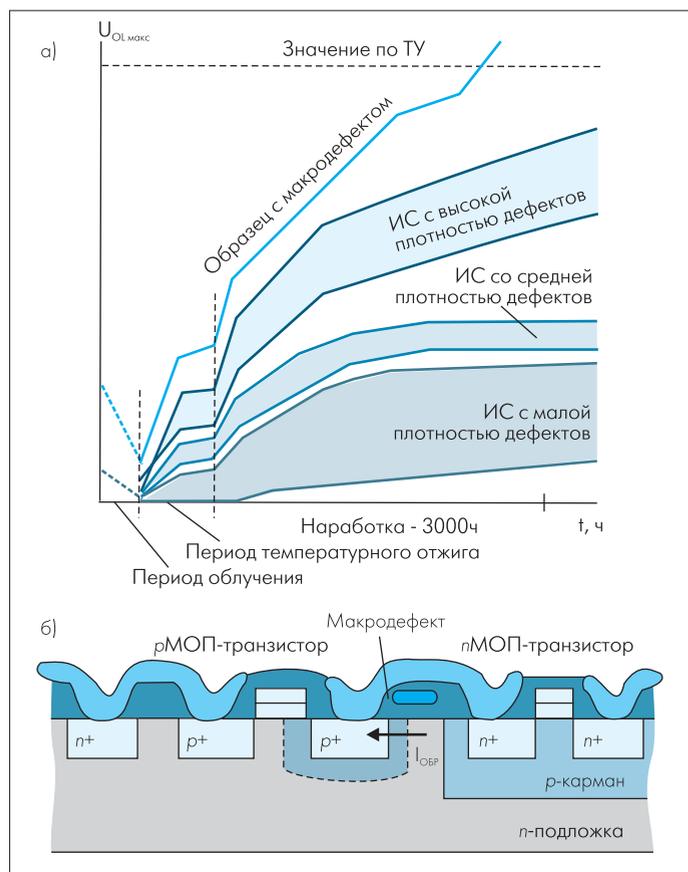


Рис.4. Логический КМОП-элемент: а) – Изменение предельного значения выходного напряжения логического нуля $U_{OL\max}$; б) – Фрагмент структуры

ИС после облучения, термообработки и ускоренных испытаний (наработки при максимальной температуре эксплуатации в электрическом режиме). Как можно видеть, после РТО микросхемы разделяются по группам с малой, средней и высокой плотностью дефектов. Выделяется один образец с макродефектом. Увеличение U_{OL} в нем объясняется зарядкой макродефекта над p/n -переходом стока закрытого p -канального МОП-транзистора (см. рис.4б) [5].

Таким образом, отбраковка микросхем с макродефектами, а также других ИС с высокой плотностью дефектов оксидных пленок позволит значительно повысить надежность бортовых устройств космических аппаратов.

В заключение следует отметить, что до настоящего времени проблеме макродефектов в оксидных пленках планарных структур должного внимания не уделялось. Исследования в этой области были стимулированы обнаружением пострадиационного эффекта. Макродефекты в оксидных пленках могут образовываться не только в процессе изготовления ИС, но и при воздействии тяжелых частиц высоких энергий, что наблюдалось при облучении тестовых МОП-структур в реакторе быстрыми нейтронами [12]. Зарядка макродефектов может происходить в современных СБИС и вследствие образования "горячих" носителей заряда в субмикронных каналах МОП-транзисторов. Поэтому отбраковку СБИС целесообразно проводить и при использовании их в устройствах, не подвергающихся радиационному воздействию, но с жесткими требованиями по надежности.

Автор благодарит аспирантов В.В.Гришакова и А.П.Поливанова за помощь в подготовке статьи, а также профессора О.Р.Мочалкину

и доцента Г.И.Зябрева за просмотр рукописи и сделанные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов В.Д., Ройзин Н.М. Роль ионизации в образовании поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик-полупроводник. – Микроэлектроника, 1973, т. 2, вып.6.
2. Попов В.Д., Поливанов А.П. Исследование явления перезарядки дефектов в пленке оксида кремния при послерадиационной термообработке. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология). – В кн.: Мат-лы науч.-техн. семинара. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 1998.
3. Гришаков В.В., Попов В.Д. Модель макродефекта в подзатворном оксиде кремния МОП-транзисторов. Научная сессия МИФИ-99: Сб. науч. тр. Т.6. – М.: МИФИ, 1999.
4. Schwank J.R., Winokur P.S., McWhorter P.J. et al. Physical mechanisms contributing to device "rebound". – IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984., vol. NS-31, N 6.
5. Ванин В.И., Гришаков В.В., Малышев М.М., Попов В.Д. Определение параметров крупных дефектов оксида кремния в планарных ИС. – Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру: Науч.-техн. сб., 2001, вып. 1-2. – М.: ЦНИИАтоминформ.
6. Попов В.Д. Исследование дефектов в пленках SiO_2 методом измерения напряжения пробоя. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология). – В кн.: Мат-лы науч.-техн. семинара. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 1996.
7. Chou N.J., Eldridge J.M. On the statistics governing the defect density determination in SiO_2 films. - J. Electrochem. Soc., 1973, vol.120, N 8.
8. Гришаков В.В., Поливанов А.П., Попов В.Д. Прогнозирование вероятности безотказной работы планарных ИС с учетом технологических крупных дефектов. Моделирование и исследование сложных систем: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. "Моделирование электронных приборов и техпроцессов, обеспечение качества, надежности и радиационной стойкости приборов и аппаратуры" (Севастополь, 12-20 сентября 1998 г.). – М.: МГАПИ, 1999.
9. Попов В.Д., Катеринич И.И., Курин Ф.М. Радиационная технология: уникальные возможности в производстве МОП-интегральных схем. – Chip News, 1997, №3 (12).
10. Поливанов А.П., Попов В.Д. Модель восстановления работоспособности элементов СБИС ОЗУ после g-облучения. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология). – В кн.: Мат-лы докладов XXX междунар. науч.-техн. семинара (Москва, 29 ноября – 3 декабря 1999 г.). – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2000.
11. Кононов В.К., Малинин В.Г., Осипцев Д.А., Попов В.Д. Отбраковка потенциально ненадежных интегральных микросхем с использованием радиационно-стимулирующего метода. Радиационно-надежные характеристики изделий электронной техники в экстремальных условиях эксплуатации/ Под ред. Ю.Н.Торгашова. – С.-Пб.: Электронстандарт, 1994.
12. Воронкова Г.М., Кузьмина А.В., Попов В.Д. Исследование крупных дефектов в МОП-структурах после облучения и низкотемпературного отжига. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология). – В кн.: Мат-лы науч.-техн. семинара. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 1997.