

УДК 621.315.592

# ЭФФЕКТЫ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В ПРИБОРАХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ НА БАЗЕ КРЕМНИЯ

© 2016 г. К. И. Таперо<sup>1,2</sup><sup>1</sup>ФГУП «Научно-исследовательский институт приборов»  
промзона Тураево, стр. 8, Лыткарино, Московская область, 140080, Россия<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Рассмотрены дозовые ионизационные эффекты в полупроводниковых приборах и интегральных схемах на базе кремния в условиях воздействия низкоинтенсивного ионизирующего излучения космического пространства. Дано описание механизма радиационно-индуцированного накопления заряда в диэлектрике МОП-структур и на границе раздела полупроводник/диэлектрик. Также проанализирована природа дефектов в структуре Si/SiO<sub>2</sub>, отвечающих за эти процессы. Преведены особенности отжига накопленного при облучении заряда в диэлектрике и поверхностных состояний.

Рассмотрены особенности деградации МОП- и биполярных приборов в условиях низкоинтенсивного радиационного облучения, характерного для космического пространства. Показано, что в условиях низкоинтенсивного облучения в МОП-приборах возникают зависящие от времени эффекты, обусловленные особенностями кинетики накопления и отжига зарядов в структуре Si/SiO<sub>2</sub>, тогда как в биполярных приборах наблюдаются истинные эффекты мощности дозы.

Дан обзор основных методов экспериментального моделирования эффектов низкоинтенсивного облучения при ускоренных испытаниях кремниевых приборов и микросхем. Показано, что для моделирования зависящих от времени эффектов в МОП-приборах и истинных эффектов мощности дозы в приборах и микросхемах биполярной технологии используют принципиально разные экспериментальные подходы.

**Ключевые слова:** полупроводниковые приборы, интегральные схемы, дозовые ионизационные эффекты, ионизирующее излучение, эффекты низкоинтенсивного облучения, радиационная стойкость

## Введение

Полупроводниковые приборы (ПП) и интегральные схемы (ИС) на базе кремния составляют основу элементной базы электроники, применяемой на борту космических аппаратов. Одним из важнейших эксплуатационных факторов, влияющих на работоспособность радиоэлектронной аппаратуры космического применения, а также комплектующих ее ПП и ИС, является ионизирующее излучение (ИИ) космического пространства (КП). Это излучение состоит из потоков высокоэнергетических частиц (электронов, протонов, тяжелых ионов) [1–6]. Под действием ИИ КП происходит деградация параметров ПП и ИС. При этом определяющую роль играют радиационные эффекты двух видов:

- ионизационные эффекты, причиной возникновения которых является первичная ионизация материала активных и пассивных областей облучаемых изделий;
- эффекты образования структурных повреждений (смещений атомов полупроводникового материала из узлов кристаллической решетки).

Одним из основных элементов современных ПП и ИС на базе кремния является структура Si/SiO<sub>2</sub>. Эта структура может вы-

ступать в роли одного из активных элементов (например, изделия МОП- или КМОП-технологии) или как пассивный элемент (граница раздела пассивирующего оксида с кремнием, имеется во всех технологических вариантах изготовления ИС и ПП на базе кремния). Главным свойством этой структуры при изучении радиационно-индуцированной деградации является накопление зарядов в диэлектрике и на границе раздела полупроводник—диэлектрик при облучении. Вследствие этого происходит изменение электрофизических характеристик элементов ИС:

- изменяется пороговое напряжение МОП-транзисторов;
- возрастают токи утечки транзисторов в закрытом состоянии;
- снижается коэффициент передачи по току биполярных транзисторов;
- образуются каналы утечки, связывающие различные элементы ИС;
- возрастает ток потребления ИС;
- увеличиваются входные токи и др.

Такие эффекты относят к классу поверхностных радиационных эффектов. По своей природе эти эффекты являются ионизаци-

онными. Они заметно проявляются при относительно небольших дозах:  $\sim 10^3$ — $10^4$  рад(Si) в зависимости от конструктивно–технологического исполнения ПП и ИС (в ряде случаев и при меньших дозах). Поэтому часто радиационная стойкость ПП и ИС на базе кремния определяется именно поверхностными (ионизационными) радиационными эффектами. (Эффекты структурных повреждений обычно наблюдаются при более высоких значениях поглощенной дозы, когда уже, возможно, произошел отказ из–за поверхностных эффектов.)

Настоящий обзор посвящен вопросам ионизационных дозовых эффектов в приборах и микросхемах на базе кремния, поскольку в условиях применения на борту космических аппаратов такие эффекты — одна из наиболее важных причин деградации ПП и ИС. При этом основное внимание будет уделено особенностям деградации в условиях длительного низкоинтенсивного облучения, характерного для условий космического применения.

### Общее описание радиационно–индуцированного накопления заряда в структуре Si/SiO<sub>2</sub>

Основными эффектами, возникающими в структурах Si/SiO<sub>2</sub> вследствие воздействия ИИ, являются накопление положительного заряда в объеме диэлектрика и рост плотности поверхностных состояний (ПС) на границе раздела полупроводник—диэлектрик. При воздействии ИИ равномерно по всему оксиду образуются электронно–дырочные пары. Генерация электронно–дырочных пар определяет практически все дозовые ионизационные эффекты. Генерированные носители вызывают встраивание заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник—диэлектрик, что приводит к деградации ПП и ИС.

Механизм деградации структуры Si/SiO<sub>2</sub> проиллюстрирован на примере МОП–прибора на рис. 1 [7]. На рис. 1 показана зонная диаграмма МОП–структуры для конденсатора с *p*–подложкой при подаче положительного смещения на затвор. Сразу после образования электронно–дырочных пар большинство электронов быстро дрейфуют (в течение пикосекунд) по направлению к затвору, а дырки дрейфуют по направлению к границе Si/SiO<sub>2</sub>. Однако перед тем, как электроны покинут оксид, часть из них успевает прорекомбинировать с дырками. Ту часть электронно–дырочных пар, которая избежала рекомбинации, называют электронно–дырочным выходом (выходом электронно–дырочных пар или выходом заряда). Дырки, избежавшие «начальной» рекомбинации, будут перемещаться по оксиду по направлению к границе Si/SiO<sub>2</sub>, перескакивая по локализованным в оксиде состояниям. При

подходе к границе часть дырок захватывается, образуя положительный встроенный заряд оксида.

При «перескакивании» дырок по оксиду или при их захвате вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub> легко высвобождаются ионы водорода (протоны). Эти ионы могут дрейфовать по направлению к границе Si/SiO<sub>2</sub>, где они могут вступить в реакции с образованием поверхностных ловушек (поверхностных состояний). При подаче на затвор МОП–структуры напряжения, равного пороговому, поверхностные ловушки заряжены преимущественно положительно в случае структуры на *n*–кремнии и отрицательно в случае структуры на *p*–кремнии.

Кроме зарядов в диэлектрике и на поверхностных ловушках, образующихся в подзатворных оксидах, встраивание заряда также будет иметь место и в других оксидах, включая полевые оксиды и встроенные оксиды в структурах «кремний–на–изоляторе» (КНИ) [4—7]. Радиационно–индуцированное встраивание зарядов в подзатворных, полевых и встроенных оксидах может привести к деградации приборов и отказу микросхем. Встроенный в подзатворном оксиде положительный заряд может инвертировать область канала МОП–транзистора и привести к возникновению тока утечки в выключенном состоянии. Это приведет к повышению статического тока потребления ИС, а также может вызвать отказ ИС. Аналогично положительный заряд, захваченный в полевом или встроенном оксиде, может вызвать значительное повышение статического тока потребления ИС из–за возникновения паразитных каналов утечки в транзисторах, а также между отдельными элементами ИС. В действительности для современных КМОП ИС с очень тонкими подзатворными оксидами радиационная деградация обычно определяется радиационно–индуцированным встраиванием заряда в полевых и встроенных оксидах. Эти же процессы могут быть основной причиной дозовых отказов биполярных ИС.

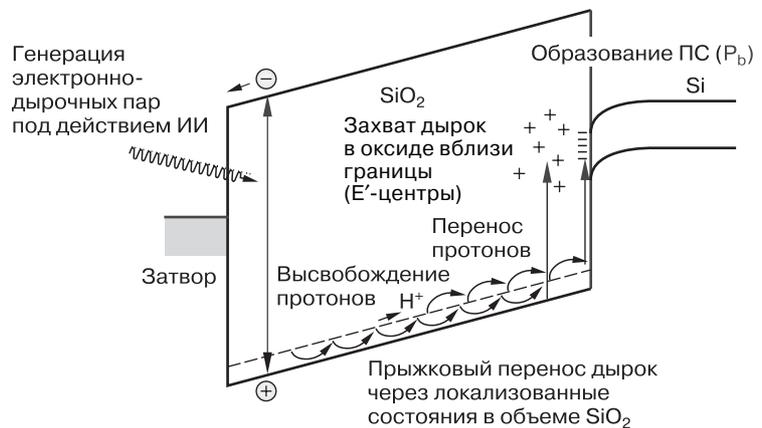


Рис. 1. Зонная диаграмма МОП–конденсатора с положительным смещением на затворе, иллюстрирующая основные процессы радиационно–индуцированного встраивания заряда в структуре Si/SiO<sub>2</sub> [7]

Fig. 1. Band diagram of the MOS capacitor with a positive gate bias, illustrating the main processes of radiation-induced charge incorporation in the Si/SiO<sub>2</sub> structure [7]

Высокая концентрация поверхностных состояний может привести к снижению подвижности носителей заряда и повышению порогового напряжения  $n$ -канального транзистора. Это ведет к снижению быстродействия транзисторов с ухудшением временных параметров ИС. В биполярных транзисторах вследствие роста скорости поверхностной рекомбинации может наблюдаться снижение коэффициента передачи по току в схеме с общим эмиттером, что, в свою очередь, будет сказываться на характеристиках ИС биполярной технологии.

Основную роль в накоплении заряда в диоксиде кремния играют точечные парамагнитные дефекты, присутствие которых обычно связывают с наличием оборванных связей в структуре Si/SiO<sub>2</sub> [4, 5, 7, 8]. Из них наиболее важными с точки зрения накопления заряда в диэлектрике являются E'-центры. Как правило, E'-центры являются донороподобными центрами, которые могут находиться в нейтральном состоянии или быть положительно заряженными. Большинство E'-центров характеризуются неспаренным электроном, локализованным на атоме кремния, который связан с тремя атомами кислорода (так называемый трехвалентный кремний). Химическое обозначение для E'-центра записывается в виде  $\uparrow\text{Si}\equiv\text{O}_3$  или  $\bullet\text{Si}\equiv\text{O}_3$ . E'-центры в любой из своих форм обусловлены локальным недостатком кислорода или избытком кремния. Поэтому в структуре Si/SiO<sub>2</sub> они будут преимущественно локализованы в областях SiO<sub>2</sub>, характеризующихся избытком кремния, т. е. вблизи границы раздела с кремнием.

В настоящее время выделяют порядка 10 видов E'-центров. Они различаются по наличию или отсутствию дополнительных комплексов  $^+\text{Si}\equiv\text{O}_3$  или по наличию дополнительных атомов, главным образом O или H. При этом одним из самых распространенных видов E'-центра, структура которого известна наиболее достоверно, является E'<sub>γ</sub>-центр, представляющий собой соединение, состоящее из двух комплексов  $\text{O}_3\equiv\text{Si}\bullet^+\text{Si}\equiv\text{O}_3$ . Наличие этих дефектов связано с тем, что в оксидах изначально содержатся нестехеометрические структуры  $\text{O}_3\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv\text{O}_3$ , обусловленные недостатком кислорода и являющиеся предшественниками E'<sub>γ</sub>-центров. При захвате дырки на вакантное место одного из атомов кремния центр становится парамагнитным и положительно заряженным [7, 8].

Как правило, в термически выращенных подзатворных оксидах наблюдается хорошая корреляция (приблизительно один к одному) между количеством E'-центров и зарядом в оксиде [9]. Однако в случае толстых захороненных оксидов в КНИ-структурах и полевых оксидов, а также в ряде случаев подзатворных оксидов такая корреляция может отсутствовать [10—15]. Это по-прежнему определяет актуальность задачи исследования природы дефектов, отвечающих за накопление положительного заряда в оксидах.

Что касается механизма накопления ПС при радиационном облучении, то полного понимания этих физических процессов до сих пор нет. Наиболее распространенными являются модели, рассматривающие накопление ПС как двухстадийный процесс, протекающий с участием ионов водорода, высвобождаемых в SiO<sub>2</sub> [7, 16—18]. На первой стадии дырки, генерированные в SiO<sub>2</sub> при воздействии ИИ, могут переноситься как по направлению к границе Si/SiO<sub>2</sub>, так и по направлению к границе затвор/SiO<sub>2</sub>. При этом они могут разрывать напряженные связи Si—O и слабые связи комплексов «трехвалентного кремния» с водородом. В результате последнего процесса высвобождаются ионы водорода. На второй стадии высвобожденные ионы водорода дрейфуют по направлению к границе раздела SiO<sub>2</sub>/Si, где они разрывают связи Si—H и Si—OH, образуя ПС. Согласно этой модели, накопление ПС будет наблюдаться только при подаче на затвор МОП-структуры положительного смещения. В целом это согласуется с имеющимися экспериментальными данными [19—21].

Основным видом точечных электрически активных дефектов на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>, отвечающих за значение плотности ПС, является P<sub>b</sub>-центр [7—9, 22—25]. Этот центр может быть представлен как атом кремния на границе, связанный с тремя другими атомами кремния и имеющий одну оборванную связь. Химическое обозначение P<sub>b</sub>-центра записывается в виде  $\bullet\text{Si}\equiv\text{Si}_3$ . На поверхности кремния (111) оборванная связь ориентирована перпендикулярно к границе. Кроме того, P<sub>b</sub>-центр расположен в пределах одного атомного слоя от границы в сторону Si или SiO<sub>2</sub>. На поверхности (110) оборванные связи P<sub>b</sub>-центра ориентированы вдоль двух тетраэдрических направлений [111]. Причем оборванных связей, лежащих в плоскости границы, обнаружено не было. Наиболее сложную структуру P<sub>b</sub>-центры имеют на поверхности кремния (100). Здесь было идентифицировано два различных типа P<sub>b</sub>-центров, каждый из которых может иметь оборванные связи, ориентированные в двух направлениях. Первый вид — P<sub>b0</sub>-центр, представляющий собой соединение  $\bullet\text{Si}\equiv\text{Si}_3$ , оборванная связь которого может быть ориентирована вдоль двух направлений [111]. Второй вид — P<sub>b1</sub>-центр, представляющий собой частично окисленное соединение  $\bullet\text{Si}\equiv\text{Si}_2\text{O}$  с оборванной связью, ориентированной в тех же направлениях.

Во многих работах указано, что значение плотности ПС коррелирует с плотностью P<sub>b</sub>-центров в пределах погрешности, равной коэффициенту 2. Остальные ловушки, возможно, представляют собой напряженные связи, углы и длины которых немного отличаются от присущих неповрежденному кремнию. Это приводит к разбросу по энергии. Но в отличие от этих ловушек, P<sub>b</sub>-центры наблюдали даже в образцах с очень низкой плотностью ПС [8]. Обычно энергетическое распределение P<sub>b</sub>-центров

имеет пик в середине запрещенной зоны и спадает по мере приближения к зоне проводимости или валентной зоне [7]. Это распределение согласуется с предположением, что в середине запрещенной зоны ПС парамагнитны или нейтральны. В верхней части запрещенной зоны ПС акцептороподобны (могут принять электроны), отрицательно заряжены, содержат два электрона, и  $P_b$ -центры диамагнитны. В нижней части запрещенной зоны ПС донороподобны (могут отдавать электроны), положительно заряжены, не содержат электронов и диамагнитны. В середине зоны ПС нейтральны, содержат один электрон и парамагнитны. Следует, однако, отметить, что далеко не всегда пик распределения плотности  $P_b$ -центров приходится на середину запрещенной зоны кремния. В частности, в работе [8] показано, что максимальная плотность ПС может приходиться на энергетические уровни  $E_v + 0,38$  эВ и  $E_v + 0,8$  эВ.

### Эффекты длительного низкоинтенсивного облучения

При эксплуатации в условиях космического пространства ПП и ИС испытывают воздействие низкоинтенсивного ИИ. Мощность дозы такого ИИ на несколько порядков величины ниже, чем типичные значения, выбираемые при радиационных испытаниях в лабораторных условиях. При такой интенсивности облучения радиационный отклик ПП и ИС может отличаться от отклика при высоких или средних значениях мощности дозы ИИ. В этом случае говорят об «эффектах низкоинтенсивного облучения». При этом различают «истинные» эффекты мощности дозы (**TDRE** — *true dose rate effect*) и зависящие от времени эффекты (**TDE** — *time-dependent effect*) [26].

Понятие TDE подразумевает следующее. Степень деградации по окончании длительного низкоинтенсивного облучения приблизительно совпадает со степенью деградации при высокоинтенсивном облучении до того же уровня дозы с последующим отжигом при комнатной температуре. При этом суммарное время высокоинтенсивного облучения и отжига должно совпадать с длительностью низкоинтенсивного облучения. Рис. 2 иллюстрирует данный эффект на примере изменения тока потребления ИС, изготовленной по КМОП/КНС-технологии, в процессе облучения и последующего отжига (температуру и электрический режим при облучении и отжиге поддерживали неизменными) [27].

Из рис. 2 видно, что значения тока потребления после облучения до одного и того же уровня при разных мощностях дозы лежат на одной кривой отжига (см. рис. 2, пунктирная линия). Такое поведение является типичным практически для всех изделий МОП- и КМОП-технологии.

Понятие TDRE подразумевает следующее. Степень деградации по окончании длительного низ-

коинтенсивного облучения отличается от степени деградации при высокоинтенсивном облучении до того же уровня дозы с последующим отжигом при комнатной температуре. При этом суммарное время высокоинтенсивного облучения и отжига должно совпадать с длительностью низкоинтенсивного облучения. Рис. 3 [28] иллюстрирует данный эффект на примере изменения входного тока биполярного компаратора LM111. Из рис. 3 видно, что облучение при

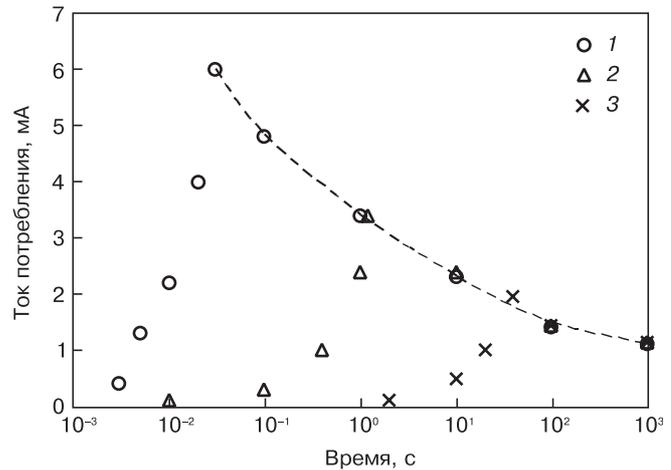


Рис. 2. Зависимости тока потребления микросхемы КМОП/КНС-технологии от времени облучения (возрастающие участки зависимостей) дозой 55 крад(Si) и последующего отжига (по данным работы [27]): 1 — мощность дозы облучения  $1,7 \cdot 10^6$  рад(Si)/с; 2 —  $3,2 \cdot 10^5$  рад(Si)/с; 3 —  $1,1 \cdot 10^3$  рад(Si)/с

Fig. 2. CMOS/SoS IC current consumption as a function of irradiation time (ascending curve sections) with 55 krad(Si) and subsequent annealing (borrowed from [27]): (1) dose rate  $1,7 \cdot 10^6$  rad(Si)/s; (2)  $3,2 \cdot 10^5$  rad(Si)/s; (3)  $1,1 \cdot 10^3$  rad(Si)/s

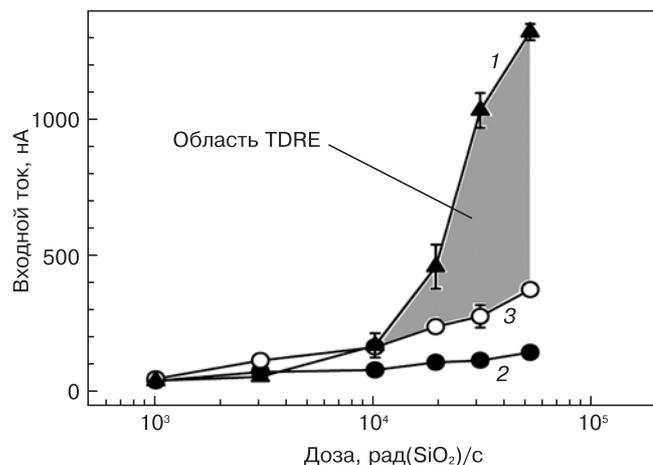


Рис. 3. Дозовые зависимости входного тока компаратора LM111, полученные при низкоинтенсивном облучении с мощностью дозы 0,01 рад(SiO<sub>2</sub>)/с (1) и высокоинтенсивном облучении 50 рад(SiO<sub>2</sub>)/с (2) с последующим отжигом (3) при комнатной температуре [28]. Суммарное время высокоинтенсивного облучения и отжига равно времени облучения при низкой интенсивности

Fig. 3. LM111 comparator input current as a function of dose for (1) low-intensity irradiation with 0.01 rad(SiO<sub>2</sub>)/s, (2) high-intensity irradiation with 50 rad(SiO<sub>2</sub>)/s and (3) after subsequent low-temperature annealing [28]. Total high-intensity irradiation and annealing time is equal to low-intensity irradiation time

мощности дозы 0,01 рад(Si)/с приводит к существенно большему росту входного тока, чем облучение при мощности дозы 50 рад(Si)/с с последующим отжигом при комнатной температуре (время облучения при 0,01 рад(Si)/с равно суммарному времени облучения при 50 рад(Si)/с и отжига).

Как правило, в случае приборов, изготовленных по МОП- и КМОП-технологии, в основном наблюдаются TDE. При этом в большинстве случаев увеличение длительности облучения при фиксированном уровне поглощенной дозы или суммарного времени облучения и отжига приводит к снижению степени деградации. (Исключением могут быть случаи, когда доминирующим механизмом деградации является встраивание ПС на границе раздела полупроводник—диэлектрик.) В случае приборов, изготовленных по биполярной технологии, как правило, наблюдаются TDRE. Причем низкоинтенсивное облучение обычно приводит к существенно большей деградации, чем облучение при высокой мощности дозы (даже с последующим отжигом). В англоязычной литературе для обозначения эффекта «усиленной» деградации при низкоинтенсивном облучении, характерной для биполярных ПП и ИС, используют термин — «*enhanced low dose rate sensitivity*» (ELDRS).

**Зависящие от времени эффекты в изделиях МОП- и КМОП-технологии.** Возникновение TDE при облучении изделий МОП- и КМОП- технологии обусловлено особенностями кинетики накопления и отжига (нейтрализации) заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник — диэлектрик. На-

копление заряда в диэлектрике при радиационном облучении — это сравнительно быстрый процесс, зависящий от напряженности электрического поля и температуры [29, 30]. Экспериментальные данные говорят о том, что в случае тонких подзатворных оксидов при типовых электрических режимах и комнатной температуре процессы переноса дырок и их захвата на ловушки заканчиваются в течение микросекунд с момента генерации неравновесных электронно-дырочных пар ИИ [7]. Для толстых полевых оксидов или захороненных оксидов в КНИ-структурах, в которых имеют место очень слабые электрические поля, перенос дырок может протекать в течение миллисекунд или более того.

Параллельно с радиационно-индуцированным захватом заряда в оксиде протекает процесс его нейтрализации. Кинетика нейтрализации при комнатной температуре захваченного в оксиде заряда показана на рис. 4 [31]. На рис. 4 представлена зависимость вклада заряда в оксиде в сдвиг порогового напряжения  $\Delta V_{ot}$  от времени для стойких  $n$ -канальных транзисторов с поликремниевым затвором при их облучении дозой 100 крад( $\text{SiO}_2$ ) при разных значениях мощности дозы и последующем отжиге при комнатной температуре. Из рис. 4 видно, что при отжиге  $\Delta V_{ot}$  спадает в зависимости от времени по логарифмическому закону. Причем после облучения одной и той же дозой, но в течение разного времени  $t$  (т. е. при различной мощности дозы) значения  $\Delta V_{ot}$  попадают на одну и ту же линию (приблизительно линейная зависимость  $\Delta V_{ot}$  от  $\lg t$ ). Почти то же самое наблюдали на рис. 2. Таким образом, можно заключить, что скорость нейтрализации захваченного в оксиде заряда не зависит от мощности дозы, и наблюдаемые эффекты относятся к TDE.

Скорость нейтрализации заряда в оксиде в большинстве случаев зависит от температуры. Как правило, увеличение температуры приводит к росту скорости нейтрализации накопленного заряда. Однако в некоторых технологических вариантах такая температурная зависимость может отсутствовать [7, 32, 33].

Нейтрализация заряда, накопленного в оксиде, также зависит от напряжения смещения [32]. Причем зависит как от абсолютной величины напряжения, так и от его полярности. Для ускорения процесса нейтрализации накопленного при облучении заряда необходимо подавать на затвор положительное смещение, при этом скорость нейтрализации заряда растет с увеличением абсолютного значения приложенного напряжения (обычно с тенденцией к насыщению). Кроме того, нейтрализация накопленного в оксиде заряда может быть обратимой. В частности, в работе [32] было показано, что после полной нейтрализации накопленного заряда в процессе отжига с подачей на затвор напряжения +10 В последующее переключение полярности приложенного при отжиге напряжения (-10 В) вновь приводило к встраиванию

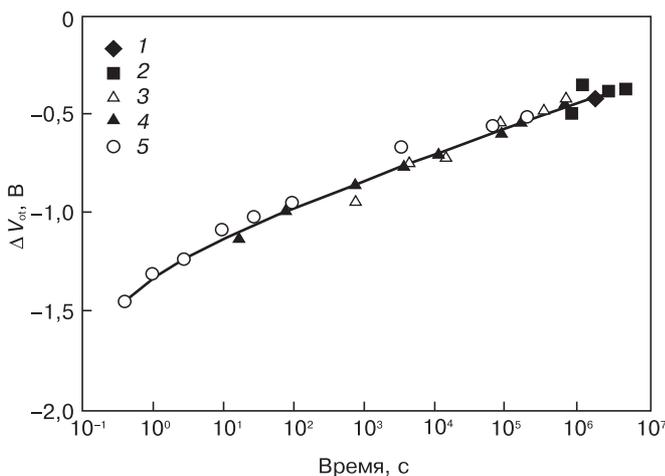


Рис. 4. Нейтрализация при комнатной температуре заряда, захваченного в оксиде транзисторов, облученных дозой 100 крад( $\text{SiO}_2$ ) при разных значениях мощности дозы [31]: 1, 2 — 0,05 и 0,165 рад( $\text{SiO}_2$ )/с соответственно,  $^{137}\text{Cs}$ ; 3, 4 — 52 и 5550 рад( $\text{SiO}_2$ )/с, рентгеновское излучение; 5 —  $6 \cdot 10^9$  рад( $\text{SiO}_2$ )/с, линейный ускоритель LINAC, 2 имп.

Fig. 4. Room temperature charge buildup neutralization for oxide in transistors after 100 krad( $\text{SiO}_2$ ) irradiation at different dose rates [31]: (1 and 2) 0.05 and 0.165 rad( $\text{SiO}_2$ )/s, respectively,  $^{137}\text{Cs}$ ; (3 and 4) 52 and 5550 rad( $\text{SiO}_2$ )/s, X-ray; (5 and 6)  $6 \cdot 10^9$  rad( $\text{SiO}_2$ )/s, LINAC linear accelerator, 2 pulses

положительного заряда в диэлектрике исследуемой МОП–структуры. Если циклически менять полярность приложенного смещения, то подобные снижения и повышения заряда в оксиде могут наблюдаться в течение многих циклов [34, 35]. Это свидетельствует о том, что дефекты ( $E'$ -центры), ответственные за накопление заряда в диэлектрике, не отжигаются, а лишь меняют свое зарядовое состояние.

Рассмотренные выше особенности нейтрализации заряда в оксиде могут быть объяснены на основе двух возможных механизмов: туннелирование электронов из кремния на оксидные ловушки и термоэмиссия электронов из валентной зоны  $\text{SiO}_2$  на оксидные ловушки [7, 36–38]. Первый механизм определяет зависимость скорости нейтрализации заряда от приложенного электрического поля, а второй — от температуры. Вероятность туннелирования в единицу времени электронов из кремния на оксидные ловушки экспоненциально снижается в зависимости от удаленности ловушек от границы раздела  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ . Для обмена зарядом с кремнием обычно доступны те ловушки, которые расположены в пределах  $\sim 4$  нм от этой границы [7]. Вероятность перехода электрона в единицу времени из валентной зоны оксида на ловушку экспоненциально снижается в зависимости от энергетической удаленности ловушки от потолка валентной зоны оксида. Эта вероятность экспоненциально растет с температурой и практически не зависит от пространственного положения ловушки. Таким образом, скорость нейтрализации радиационно–индуцированного заряда в диэлектрике структуры  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  и ее зависимость от температуры и приложенного электрического смещения обусловлены пространственным и энергетическим распределением ловушек в оксиде. Это распределение, в свою очередь, зависит от условий технологического процесса [37]. В радиационно–стойких вариантах МОП–структур оксидные ловушки, как правило, доступны для нейтрализации как за счет туннелирования, так и за счет термоэмиссии. В случае коммерческих технологических вариантов, для которых нейтрализация часто проявляется в меньшей степени [7], оксидные ловушки, очевидно, расположены дальше по энергии от валентной зоны оксида и дальше по расстоянию от поверхности кремния. Следовательно, они менее доступны для нейтрализации посредством термоэмиссии или туннелирования.

В отличие от встраивания заряда в оксиде при радиационном облучении, накопление ПС протекает с гораздо меньшей скоростью. Например, в случае воздействия короткого импульса ИИ накопление ПС будет наблюдаться в течение длительного времени, вплоть до  $10^3$ – $10^4$  с после окончания действия ИИ [18]. Это видно из рис. 5 [18], где показана кинетика роста плотности ПС  $\Delta D_{it}$  после окончания действия ИИ. Облучение поглощенной дозой 75 крад(Si) проводили с помощью линейного ускорителя электронов

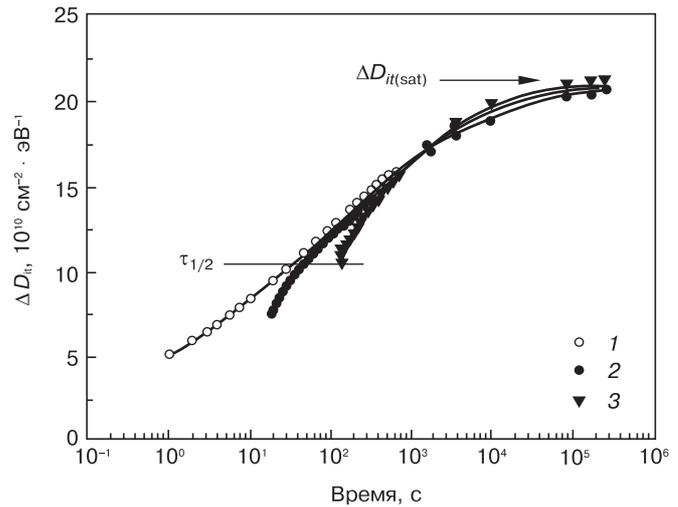


Рис. 5. Кинетика накопления плотности ПС после облучения с помощью линейного ускорителя электронов LINAC [18]: 1 — число импульсов 5 имп., мощность дозы  $1,4 \cdot 10^9$  рад/с; 2 — 70 имп.,  $1,1 \cdot 10^8$  рад/с; 3 — 572 имп.,  $1,3 \cdot 10^7$  рад/с

Fig. 5. Surface state density buildup kinetics after irradiation in LINAC linear accelerator [18]: (1) 5 pulses, dose rate  $1,4 \cdot 10^9$  rad/s; (2) 70 pulses,  $1,1 \cdot 10^8$  rad/s; (3) 572 pulses,  $1,3 \cdot 10^7$  rad/s

LINAC за разное количество импульсов электронов. Из рис. 5 видно, что после воздействия ИИ накопление ПС наблюдалось с момента первого измерения (1 с для данных с 5 имп.). Величина  $\tau_{1/2}$  на данном рисунке соответствует времени, при котором плотность ПС достигает 50 % от уровня насыщения  $\Delta D_{it(sat)}$ . Спустя  $10^4$ – $10^5$  с после облучения началось насыщение данного процесса. Такое поведение типично для процесса накопления ПС.

Накопление ПС во многом определяется приложенным электрическим смещением. В большинстве случаев для того, чтобы этот процесс протекал, необходимо подавать на затвор положительное смещение. При отрицательном напряжении на затворе встраивание ПС происходит в существенно меньшей степени (и даже может вообще отсутствовать).

В отличие от заряда в оксиде, ПС не отжигаются при комнатной температуре. Более того, вплоть до  $100$ – $125$  °C увеличение температуры приводит к росту скорости встраивания ПС [7, 39, 40]. Реальный отжиг ПС наблюдается при более высоких температурах — как правило, более  $150$  °C (рис. 6 [39]). На рис. 6 [39] показано изменение порогового напряжения  $\Delta V_{th}$ , а также вкладов в него заряда в оксиде  $\Delta V_{ot}$  и заряда ПС  $\Delta V_{it}$  для  $n$ -канальных МОП–транзисторов, облученных дозой 3 Мрад(Si) и подвергнутых после этого изохронному отжигу при последовательно повышающихся значениях температуры (в течение 30 мин при каждой температуре). Из рис. 6 видно, что при температурах от  $25$  до  $125$  °C имеет место рост плотности ПС. При температурах, превышающих  $125$  °C, число ПС начинает снижаться. После отжига при  $300$  °C значение  $\Delta V_{it}$  снижается более чем в 5 раз по сравнению со своим максимальным значением при

125 °С, но тем не менее, некоторое количество ПС все еще присутствует.

Описанные выше особенности кинетики накопления ПС при радиационном облучении и отжиге приводят к тому, что «истинная» зависимость скорости накопления ПС в МОП–приборах от мощности дозы отсутствует [5—7, 31]. Это, в частности, видно из рис. 7 [31], на котором показана зависимость сдвига порогового напряжения за счет ПС  $\Delta V_{it}$  от времени для транзисторов, облученных дозой 100 крад( $\text{SiO}_2$ ) при разных значениях мощности дозы. После об-

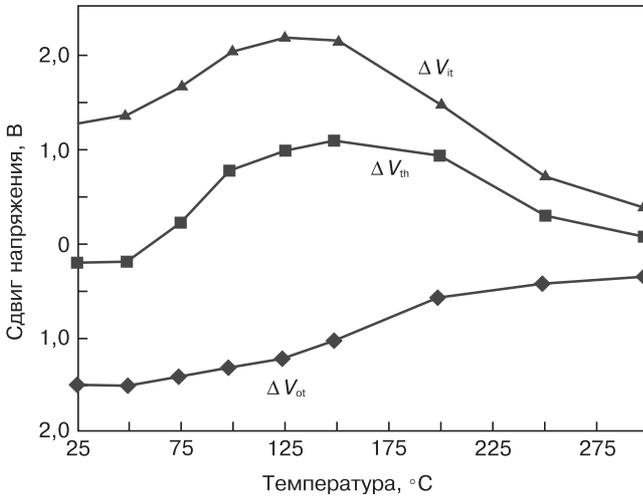


Рис. 6. Изохронный отжиг при повышенных температурах заряда ПС и заряда в оксиде после облучения дозой 3 Мрад(Si) [39]

Fig. 6. Isochronous high temperature annealing of charge at surface states and in oxide after 5 Mrad(Si) irradiation [39]

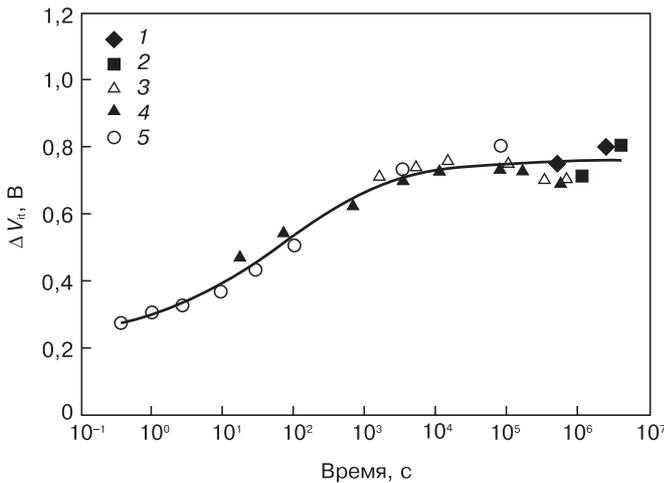


Рис. 7. Накопление ПС в транзисторах, облученных дозой 100 крад( $\text{SiO}_2$ ) при разных значениях мощности дозы с последующим отжигом при комнатной температуре с подачей смещения +6 В [31]:  
1, 2 — 0,05 и 0,165 рад( $\text{SiO}_2$ )/с соответственно,  $^{137}\text{Cs}$ ;  
3, 4 — 52 и 5550 рад( $\text{SiO}_2$ )/с, рентгеновское излучение;  
5 —  $6 \cdot 10^9$  рад( $\text{SiO}_2$ )/с, линейный ускоритель LINAC, 2 имп.

Fig. 7. Surface state buildup in 100 krad( $\text{SiO}_2$ ) irradiated transistors for different dose rates with subsequent room temperature annealing under +6 V bias [31]:  
(1 and 2) 0.05 and 0.165 rad( $\text{SiO}_2$ )/s, respectively,  $^{137}\text{Cs}$ ;  
(3 and 4) 52 and 5550 rad( $\text{SiO}_2$ )/s, X-ray;  
(5 and 6)  $6 \cdot 10^9$  rad( $\text{SiO}_2$ )/s, LINAC linear accelerator, 2 pulses

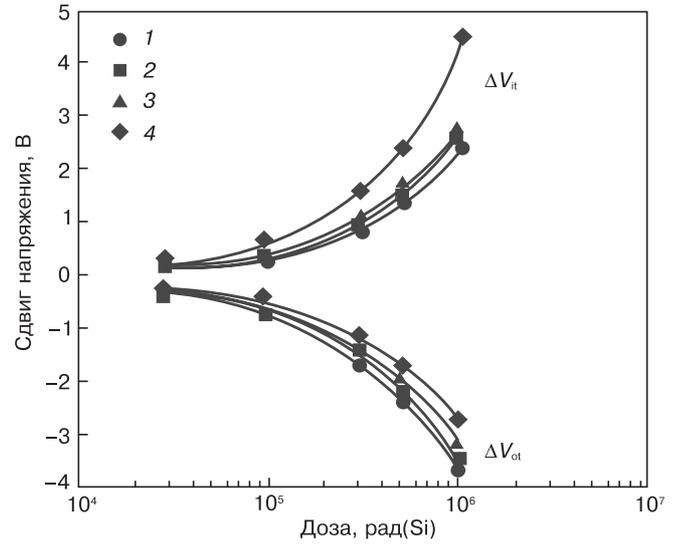


Рис. 8. Сдвиг порогового напряжения, обусловленный накопленным зарядом в оксиде и на ПС, для  $n$ -канальных транзисторов, облученных при различных значениях мощности дозы [41]:  
1 — 200 рад(Si)/с; 2 — 20 рад(Si)/с; 3 — 2 рад(Si)/с;  
4 — 0,1 рад(Si)/с

Fig. 8. Threshold voltage shift due to charge buildup in oxide and at surface states for  $n$ -channel transistors irradiated with different dose rates [41]:  
(1) 200 rad(Si)/s; (2) 20 rad(Si)/s; (3) 2 rad(Si)/s;  
(4) 0.1 rad(Si)/s

лучения каждый транзистор отжигали с подачей на затвор смещения. Напряжение смещения при облучении и отжиге составляло 6 В. Из рис. 7 видно, что при одинаковом суммарном времени облучения и отжига получают одинаковые сдвиги порогового напряжения, обусловленные накоплением ПС, независимо от мощности дозы ИИ. Таким образом, наблюдаемые эффекты относятся к TDE. Если бы имел место TDRE, то данные, полученные при различных значениях мощности дозы, не ложились бы на одну и ту же кривую отклика.

Таким образом, эффекты в приборах на основе МОП–структур, связанные с влиянием мощности дозы ИИ, относятся к TDE. То есть облучение при разной интенсивности до одного и того же уровня поглощенной дозы дает одинаковый отклик, если суммарное время облучения и последующего отжига при комнатной температуре остается неизменным. Однако, если отжиг не проводить, то по окончании облучения до одного и того же уровня при разных значениях мощности дозы будут получены разные значения заряда в оксиде и плотности ПС. Это показано на рис. 8 [41], где приведены зависимости  $\Delta V_{it}$  и  $\Delta V_{ot}$  от дозы для  $n$ -канальных транзисторов, облученных с помощью гамма-источников  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  при разных значениях мощности дозы (от 0,1 до 200 рад(Si)/с). При низкой мощности дозы получают высокие значения  $\Delta V_{it}$  и низкие значения  $\Delta V_{ot}$  (по сравнению с облучением при высокой мощности дозы). Меньшие значения  $\Delta V_{it}$  при высокой мощности дозы получаются из-за того, что в этих транзисторах накопление ПС за короткое время облучения не успе-

вает насыщаться. Меньшие значения  $\Delta V_{th}$  при низкой мощности дозы объясняются тем, что при длительном низкоинтенсивном облучении в большей степени проявляется нейтрализация оксидных ловушек.

Из приведенных выше данных следует, что при определении в лабораторных условиях фактического уровня стойкости изделий МОП- и КМОП-технологии результат будет зависеть от мощности дозы ИИ, при которой проводятся эксперименты. Особенно это актуально в тех случаях, когда радиационная стойкость испытываемых изделий определяется процессами в  $n$ -канальных транзисторах, поскольку в данном случае имеет место конкуренция накопления положительного заряда в диэлектрике и отрицательного заряда ПС. (В случае  $p$ -канальных структур оба заряда имеют положительный знак, и их действие суммируется.) На рис. 9 [7] показана зависимость сдвига порогового напряжения от мощности дозы для  $n$ -канальных транзисторов, облученных дозой 1 Мрад(Si). Из рис. 9 видно, что при наибольшей мощности дозы (200 рад(Si)/с) наблюдается большой отрицательный сдвиг порогового напряжения. При наименьшей мощности дозы (0,1 рад(Si)/с) наблюдается большой положительный сдвиг порогового напряжения. При мощности дозы 2 рад(Si)/с сдвиг порогового напряжения приблизительно равен нулю. В результате при испытаниях  $n$ -канальных МОП-транзисторов при мощности дозы порядка 1–2 рад/с уровень фактической стойкости к воздействию поглощенной дозы ИИ будет выше, чем при других значениях мощности дозы. Такие результаты не будут отражать реальную деградацию прибора в условиях низкоинтенсивного излучения космического пространства.

Аналогичные результаты получаются и для микросхем, изготовленных по КМОП- или  $n$ -МОП-технологии, в случаях, когда их деградация определяется процессами в подзатворных диэлектриках  $n$ -канальных МОП-транзисторов. Следует отметить, что это часто является основной причиной деградации КМОП ИС, так как обусловлено штатными электрическими режимами на выводах микросхем. На рис. 10 [42] показаны значения уровня стойкости процессора Z80A от мощности дозы ИИ, при которой проводили испытания. Из рис. 10 видно, что при мощности дозы порядка 1 рад(Si)/с достигается максимальный уровень стойкости к воздействию поглощенной дозы ИИ.

**Истинные эффекты мощности дозы в изделиях биполярной технологии.** Основным эффектом в биполярных транзисторах (БТ), возникающим вследствие накопления поглощенной дозы ИИ, является снижение коэффициента передачи по току в схеме с общим эмиттером  $h_{21Э}$ . Коэффициент передачи по току — это один из основных классификационных параметров БТ [25, 26, 43]. Снижение  $h_{21Э}$  может достигаться как за счет структурных повреждений, вводимых при воздействии проникающей радиации,

так и за счет ионизационных дозовых эффектов. Пример радиационно-индуцированной деградации коэффициента передачи по току  $n-p-n$ -БТ показан на рис. 11 [43].

Помимо изменения  $h_{21Э}$ , накопление ионизационной дозы может привести к деградации биполярных ИС из-за образования каналов утечки между отдельными транзисторами из состава ИС или возникновению тока утечки коллектор—эмиттер [43]. Более того, некоторые ИС, например цифровые биполярные ИС, могут быть нечувствительными к изменению  $h_{21Э}$  отдельных транзисторов до тех пор, пока этот параметр не опустится ниже минимально допустимого значения. В этом случае образование радиационно-индуцированных токов утечки может

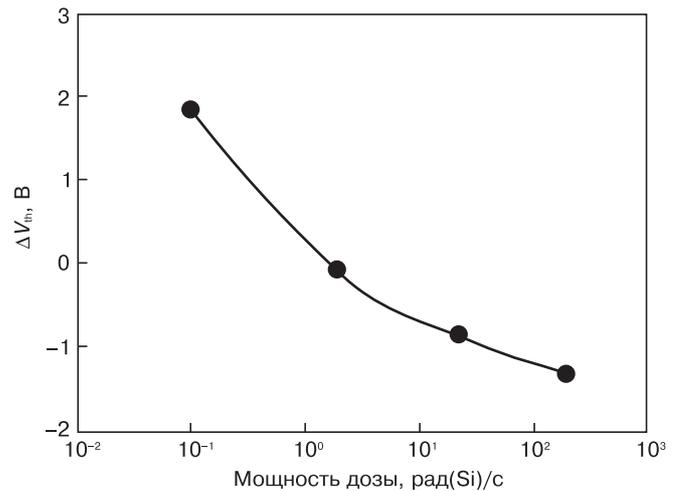


Рис. 9. Изменение порогового напряжения  $n$ -канальных транзисторов, облученных дозой 1 Мрад(Si), в зависимости от мощности дозы [7]

Fig. 9. Threshold voltage vs dose rate curve for  $n$ -channel transistors irradiated with 1 Mrad(Si) [7]

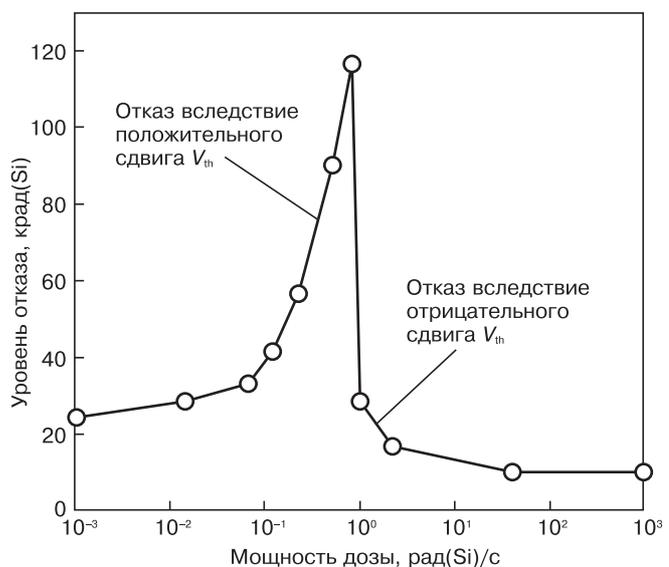


Рис. 10. Зависимость уровня стойкости микропроцессора Z80A ( $n$ -МОП-технология) от мощности дозы облучения [42]

Fig. 10. Z80A ( $n$ -CMOS technology) stability as a function of dose rate [42]

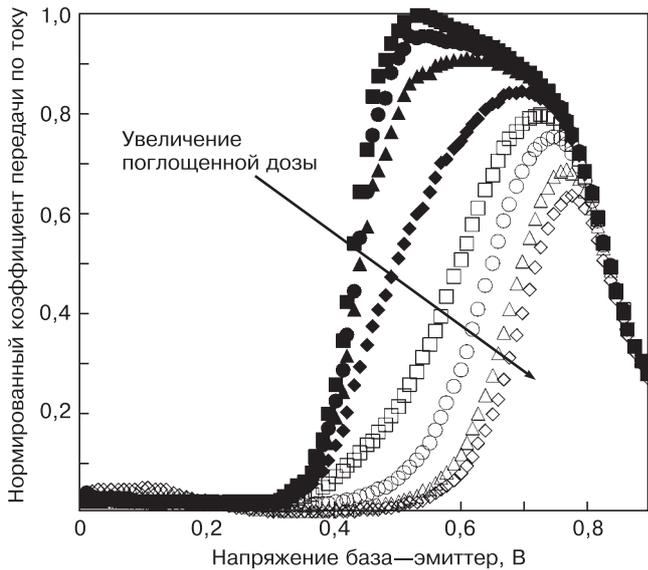


Рис. 11. Дegradация зависимости  $h_{21e}$  от напряжения база—эмиттер для  $n-p-n$ -БТ при облучении различными дозами [47]

Fig. 11. Degradation of  $h_{21e}$  vs base-emitter voltage curve for  $n-p-n$  bipolar transistor irradiated with different doses [47]

быть доминирующим механизмом отказа биполярных ИС. Причиной образования указанных каналов утечки обычно является инверсия типа проводимости приповерхностной области полупроводника (обычно  $p$ -типа), прилегающей к диэлектрику, вследствие накопления в последнем положительного заряда при воздействии ИИ.

Снижение коэффициента передачи по току при радиационном облучении преимущественно определяется ростом составляющих тока базы, обусловленных рекомбинацией в области пространственного заряда (ОПЗ) эмиттерного перехода и в базовой области. Причем в первую очередь темп рекомбинации растет в местах выхода ОПЗ перехода эмиттер—база на границу раздела  $Si/SiO_2$  [43]. Это происходит вследствие образования на данной границе поверхностных состояний, которые выступают в роли центров рекомбинации. Кроме того, темп рекомбинации в приповерхностных областях кремния может меняться вследствие электростатического влияния радиационно-индуцированных зарядов. Темп рекомбинации зависит от местоположения конкретной точки на поверхности кремния, принимая максимальное значение в случае, когда концентрации электронов и дырок приблизительно равны между собой.

Скорость поверхностной рекомбинации увеличивается пропорционально концентрации рекомбинационных центров на границе раздела  $Si/SiO_2$  в местах выхода перехода эмиттер—база на поверхность кремния. Наиболее существенный вклад в этот эффект дают ПС с энергетическими уровнями вблизи середины запрещенной зоны кремния, где они преимущественно являются амфотерными. Это существенно отличается от деградации

МОП-транзисторов. В последнем случае сдвиг порогового напряжения за счет ПС определяется интегральной плотностью ПС донорного (для  $p$ -канальных транзисторов) или акцепторного (для  $n$ -канальных транзисторов) типа в энергетическом диапазоне от середины запрещенной зоны до положения уровня Ферми в режиме начала сильной инверсии [5—8, 43]).

Важной особенностью ионизационных дозовых эффектов в изделиях биполярной технологии является повышенная чувствительность к воздействию поглощенной дозы ИИ в условиях длительного низкоинтенсивного облучения [26]. В литературе этот эффект часто обозначают в сокращенном виде ELDRS. Впервые этот эффект наблюдали еще в начале 1990-х годов [44—47], но до сих пор актуальность данной тематики не снизилась. Эффект ELDRS имеет большое значение для разработки космических систем. В лабораторных условиях испытания ПП и ИС на стойкость к воздействию поглощенной дозы ИИ проводят, как правило, при мощности дозы, существенно превосходящей значения, характерные для реальных условий космического пространства. В результате этого значения дозы отказа, определяемые при испытаниях, могут быть завышены.

Примеры зависимости степени деградации различных биполярных ИС от мощности дозы ИИ показаны на рис. 12 [46]. Из рис. 12 видно, что в разных изделиях эффект ELDRS проявляется в разной степени. Это определяется особенностями конструкции и технологии изготовления исследуемых ИС. Иногда этот эффект может вообще отсутствовать, как в случае операционного усилителя LM108 (см. рис. 12). В большинстве случаев заранее нельзя предсказать, подвержены ли испытываемые биполярные изделия

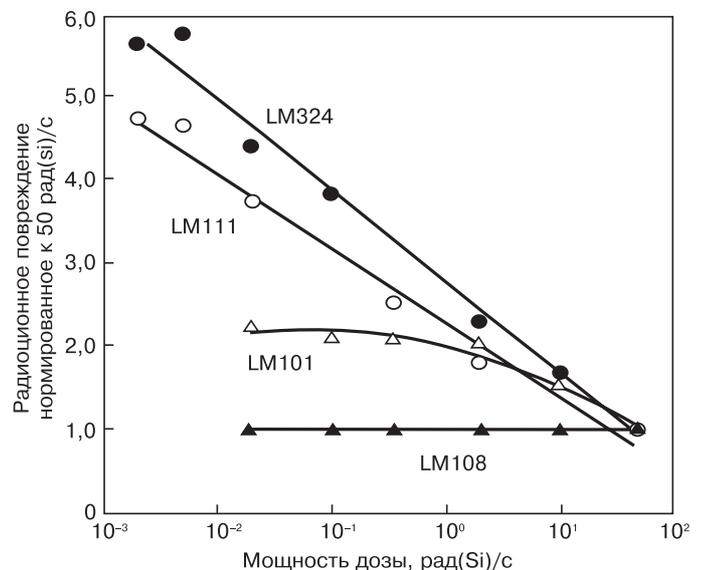


Рис. 12. Влияние мощности дозы гамма-излучения на деградацию аналоговых биполярных ИС различного технологического исполнения [46]

Fig. 12. Effect of  $\gamma$  radiation dose rate on degradation of analog bipolar IC for different technologies [46]

эффекту ELDRS. Поэтому существующие методы испытаний предусматривают проведение предварительных экспериментов по выявлению чувствительности к данному эффекту.

Как уже отмечалось ранее, ELDRS относится к TDRE. Следовательно, этот эффект не может быть промоделирован путем высокоинтенсивного облучения с последующим отжигом (см. рис. 3), как это часто делается в случае приборов МОП- и КМОП-технологии. Тем не менее зависимые от времени эффекты могут давать некоторый вклад в повышенную деградацию при низкой мощности дозы. (см. рис. 3). Хотя в подавляющем большинстве случаев такая повышенная деградация не может быть объяснена только лишь этими эффектами.

Для количественного описания эффекта ELDRS часто используют коэффициент усиления деградации. Этот коэффициент определяется как отношение изменения рассматриваемого информативного параметра после облучения до заданного уровня дозы при заданной мощности дозы к изменению этого же параметра после облучения до того же уровня дозы, но при фиксированной высокой мощности дозы. (В качестве последнего значения обычно выбирают мощность дозы из диапазона 50—300 рад(Si)/с, и даже вплоть до 1000 рад(Si)/с.) При высокой интенсивности облучения (10—100 рад(Si)/с) коэффициент усиления деградации равен 1. При снижении мощности дозы он растет и может достигать значений, вплоть до порядка величины. Более того, в работе [48] указано, что при низкой интенсивности коэффициент усиления деградации может достигать даже двух порядков величины.

В большинстве случаев для биполярных приборов, чувствительных к ELDRS, диапазон значений мощности дозы, в котором наблюдается рост степени деградации при снижении интенсивности облучения, ограничен  $\sim 10^{-3}$ —10 рад(Si)/с (рис. 13 [48]). Более того, часто мощность дозы, равная 0,01 рад(Si)/с, уже близка к «насыщению» эффекта ELDRS. При дальнейшем снижении мощности дозы не наблюдается значительный рост степени деградации облучаемых приборов. По этой причине облучение при интенсивности 0,01 рад(Si)/с (как правило, с использованием коэффициента запаса по дозе, равного 1,5) часто используют как метод испытаний биполярных приборов с учетом ELDRS. Однако в редких случаях участок насыщения ELDRS может быть смещен в область существенно меньших значений мощности дозы. В частности, в работе [49] такой эффект наблюдали при исследовании операционных усилителей LM124J. В подобных случаях испытания при мощности дозы 0,01 рад(Si)/с с полутора кратным запасом по дозе не будут соответствовать реальной деградации испытываемых приборов в условиях низкоинтенсивного излучения космического пространства.

Как уже отмечалось выше, эффект ELDRS не может быть промоделирован облучением при высо-

кой интенсивности с последующим отжигом. Однако проведение облучения при повышенной температуре может сильно ускорять деградацию биполярных приборов. Это, в частности, видно из рис. 14 [50], где показано влияние температуры при облучении на дозовую деградацию биполярных компараторов LM111. Следует отметить, что облучение при высокой интенсивности и повышенной температуре не дает полного моделирования эффекта ELDRS. Как правило, степень деградации получается ниже, чем в случае облучения при комнатной температуре и мощности дозы порядка  $10^{-3}$  рад(Si)/с (рис. 15 [51, 52]), которая, как уже отмечалось ранее, обычно соответствует участку «насыщения» эффекта ELDRS.

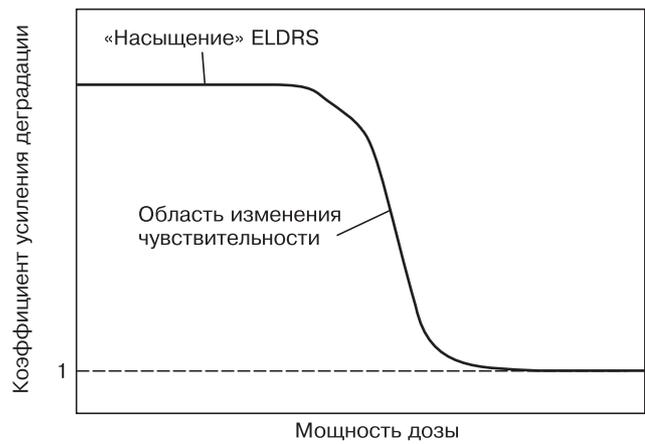


Рис. 13. Типичный вид зависимости коэффициента усиления деградации от мощности дозы ИИ для приборов, чувствительных к ELDRS [48]

Fig. 13. Typical degradation rate vs ionizing radiation dose rate curve for ELDRS sensitive devices [48]

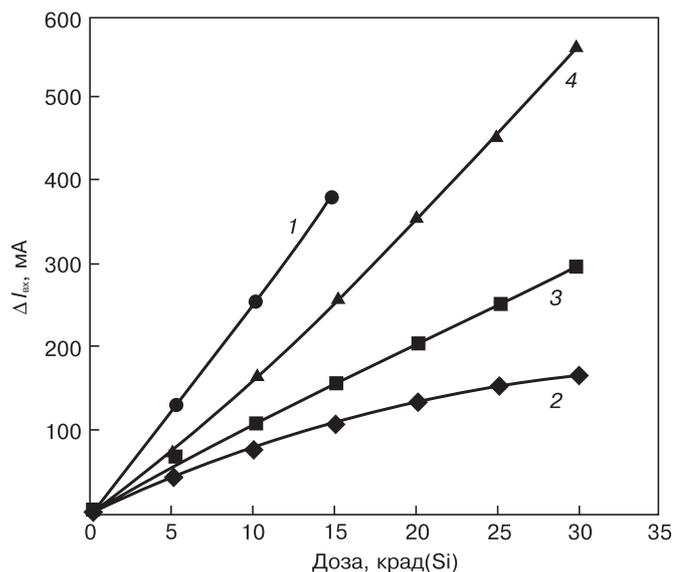


Рис. 14. Влияние температуры облучения на изменение входного тока компараторов LM111, облученных при мощности дозы 6 рад(Si)/с [50]: 1 — 0,005 рад(Si)/с,  $T \sim 25$  °C; 2—4 — 6 рад(Si)/с,  $T = 22, 60$  и  $90$  °C соответственно

Fig. 14. Effect of irradiation temperature on input current of LM111 transistors irradiated with 6 рад(Si)/s [50]: (1) 0.005 рад(Si)/s,  $T \sim 25$  °C and (2–4) 6 рад(Si)/s,  $T = 22, 60$  and  $90$  °C, respectively

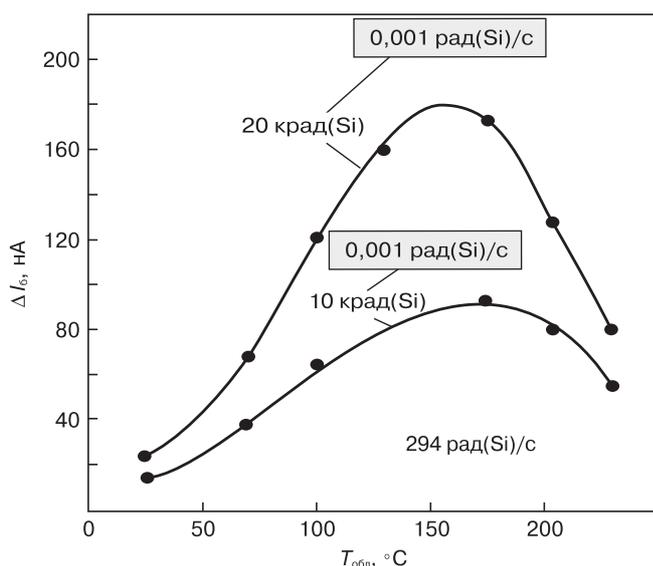


Рис. 15. Зависимость приращения тока базы горизонтального  $p-n-p$ -БТ от температуры облучения при различных поглощенных дозах [51, 52] (затененными областями показан диапазон значений  $\Delta I_b$ , соответствующий облучению при мощности дозы 0,001 рад(Si)/с)

Fig. 15. Base current increment of horizontal  $p-n-p$  bipolar transistor as a function of irradiation temperature for different total doses [51, 52] (shaded areas show  $\Delta I_b$  region for 0.001 rad(Si)/s irradiation)

На рис. 15 показано изменение тока базы горизонтального  $p-n-p$ -транзистора после облучения дозой 10 и 20 крад(Si) при высокой мощности дозы в зависимости от температуры, приложенной при облучении. Из рис. 15 видно, что оптимальная температура, при которой степень деградации наиболее близка к случаю низкоинтенсивного облучения, лежит в диапазоне от 100 до 200 °C. (В большинстве случаев эта температура превышает максимально допустимую рабочую температуру исследуемого прибора.) Кроме того, в работе [52] было показано, что эта оптимальная температура логарифмически снижается с ростом дозы облучения.

Существующие в настоящее время модели, объясняющие особенности деградации биполярных ПП и ИС в зависимости от интенсивности радиационного облучения, говорят о том, что на самом деле имеет место не «повышенная» деградация при низкоинтенсивном облучении, а «пониженная» деградация при высокоинтенсивном облучении [26]. Однако уже стало традиционным использовать термин ELDRS (т. е. «повышенная» чувствительность к низкоинтенсивному облучению), говоря об эффектах низкой интенсивности в биполярных ПП и ИС. Существующие физические модели можно разделить на три группы: модели пространственного заряда [53—57], модели бимолекулярных процессов [58—64] и модель бинарной скорости реакции [65].

Модели пространственного заряда объясняют снижение деградации при высокой интенсивности облучения влиянием пространственного заряда, образующегося вследствие медленного переноса дырок

к границе Si/SiO<sub>2</sub> в процессе облучения в условиях слабого поля в толстом диэлектрике. Снижение деградации при высокоинтенсивном облучении (или даже полное ее устранение) может происходить вследствие ряда процессов:

- захвата дырок вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub>, где они могут легко компенсироваться или отжигаться [53];
- захвата большого количества электронов вблизи дырок с образованием диполей (или усиления рекомбинации электронов и дырок), что ведет к снижению результирующего положительного заряда [54];
- изменения направления электрического поля, в результате чего дырки, образовавшиеся вблизи затвора, будут дрейфовать по направлению к затвору [56];
- образования за счет пространственного заряда дырок электростатического барьера, заставляющего протоны, высвобождаемые вблизи затвора, дрейфовать преимущественно по направлению к затвору [55, 56].

В бимолекулярных моделях эффект ELDRS объясняется на основе следующих процессов:

- рекомбинации свободных электронов и дырок [58, 60];
- рекомбинации захваченных электронов и свободных дырок [65];
- рекомбинации свободных электронов и захваченных дырок, приводящая к захвату электронов с нейтрализацией захваченных дырок [58];
- образования молекулярного водорода [58, 59];
- высвобождения водорода при захвате дырок путем «разрыва» водородных молекул [58];
- комбинации процессов разрыва водородных молекул и рекомбинации свободных электронов с захваченными или движущимися дырками [62, 63];
- повторного захвата водорода [58].

Указанные процессы учитываются при составлении систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса генерированных излучением носителей заряда через диэлектрик, их рекомбинации, захвата на ловушки, взаимодействия с водородными соединениями и т. п. В результате этих процессов накапливается заряд в диэлектрике и растет плотность ПС на границе раздела полупроводник—диэлектрик.

Модель бинарной скорости реакции была предложена в работе [65]. Здесь предполагается, что накопление ПС является результатом наличия дефектов двух видов, которые взаимодействуют в соответствии с теорией бинарной скорости реакции. Один из участников процесса, реагент А (предположительно дырки), взаимодействует с реагентом В (предположительно водородом), который характеризуется некоторым исходным количеством. Это приводит к начальному встраиванию ПС. Скорость этого процесса вначале возрастает, затем достигает максимума, после чего она снижается, поскольку уменьшается

количество реагента В. Спустя определенное время (обычно от  $10^5$  до  $5 \cdot 10^5$  с [65]) до границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> доходит реагент В, высвобождаемый в другом источнике, удаленном от границы раздела. При этом скорость встраивания ПС возрастает в 2–3 раза по сравнению со скоростью начального процесса встраивания ПС. Если время облучения совпадает с временем миграции реагента В из удаленного источника до границы раздела, то будет наблюдаться более высокая плотность накопленных ПС. Вследствие этого при низкоинтенсивном облучении, характеризующемся длительным набором поглощенной дозы, будет иметь место существенно более высокая деградация облучаемых приборов.

Следует отметить, что аналитических моделей, с приемлемой степенью адекватности описывающих эффекты низкоинтенсивного облучения биполярных приборов, до настоящего времени не предложено. Большинство существующих аналитических выражений для описания эффектов ELDRS носят качественный или феноменологический характер. Это дает возможность исследовать влияние различных параметров на эффект и качественно проанализировать ситуацию. Естественно, в большинстве случаев требуется экстракция параметров таких моделей путем «привязки» результатов расчетов к конкретным экспериментальным данным.

На степень проявления эффекта ELDRS может повлиять высокотемпературная наработка, если она проводится перед облучением исследуемых приборов. Кроме того, доминирующий механизм ELDRS в ряде случаев может зависеть от качества технологии (особенно от количества дефектов в оксиде и содержания водорода), электрического поля и условий облучения. Наличие этих сильных зависимостей от широкого круга различных факторов дает широкое разнообразие видов отклика приборов, наблюдаемых в экспериментах, и усложняет решение задачи разработки методов ускоренных испытаний биполярных ПП и ИС, учитывающих эффект ELDRS.

**Методы ускоренных испытаний приборов на базе кремния и микросхем с учетом эффектов низкоинтенсивного облучения.** Задача моделирования зависимых от времени эффектов, свойственных МОП- и КМОП-изделиям, успешно решается путем последовательного проведения процедур облучения при высокой или средней интенсивности (от  $\sim 10^0$  до  $\sim 10^2$  рад(Si)/с) и отжига при повышенной температуре. В большинстве случаев отжиг проводят при 100 °С в течение 168 ч. Этот режим выбирался для энергии активации процесса встраивания ПС, равной 0,8 эВ [7]. Данный подход содержится во всех стандартах и руководствах (американских, европейских, российских), регламентирующих испытания МОП- и КМОП-приборов и микросхем в части дозовых ионизационных эффектов с учетом эффектов низкоинтенсивного облучения.

Следует отметить, что во многих случаях про-

цедуру отжига после высокоинтенсивного облучения можно не проводить. Если деградация испытываемых приборов определяется накоплением заряда в диэлектриках, а влиянием накопления ПС можно пренебречь, то облучение при высокой интенсивности будет создавать более «жесткую» ситуацию с точки зрения радиационно-индуцированной деградации. Если при этом испытываемое изделие удовлетворяет заданным требованиям по стойкости к воздействию поглощенной дозы ИИ, то при низкоинтенсивном облучении эти требования тем более будут выполняться. (Тем не менее в таких случаях высокоинтенсивное облучение обычно проводят с использованием коэффициента запаса по дозе, значение которого может составлять от 1,5 до 3.) Такое поведение часто наблюдается в тех случаях, когда отказ микросхем происходит по причине накопления заряда в полевых оксидах [7]. Как уже отмечалось ранее, это является основной причиной дозовых отказов современных ИС (особенно с субмикронной топологической нормой проектирования). Для изделий старых технологических вариантов, а также для дискретных МОП-приборов, процессами встраивания ПС при радиационном облучении в большинстве случаев пренебречь нельзя, а следовательно, нельзя пренебречь процедурой отжига после высокоинтенсивного облучения.

Как уже отмечалось выше, в случае изделий биполярной технологии, в которых может проявляться эффект ELDRS, относящийся к истинным эффектам мощности дозы, подход «облучение—отжиг» не отражает реальную деградацию в условиях низкоинтенсивного облучения. Для испытаний биполярных изделий обычно используют или облучение при мощности дозы не более 0,01 рад(Si)/с с коэффициентом запаса по дозе не менее 1,5 раз, либо различные ускоренные методы, среди которых наиболее распространенным является облучение при повышенной температуре, в большинстве случаев равной 100 °С. В последнем случае также применяется запас по дозе. Кроме того, может быть использован запас по изменению информативных параметров. Использование коэффициентов запаса при испытаниях биполярных изделий обусловлено тем, что ни облучение при 0,01 рад(Si)/с, ни облучение при повышенной температуре не дает той степени деградации, которая наблюдалась бы при облучении с мощностью дозы, соответствующей «насыщению» эффекта ELDRS (см. рис. 12). А именно такие значения мощности дозы характерны для условий применения на борту космических аппаратов.

Отдельный интерес представляют случаи, когда TDE и TDRE дают сравнимые вклады в наблюдаемые эффекты низкоинтенсивного облучения. Особенно актуальным это может быть для изделий, объединяющих в себе биполярные элементы и элементы МОП- и КМОП-технологии, в частности для изделий БиКМОП- и БиМОП-технологии. В работах [66, 67]

было показано, что в таких случаях для корректного моделирования эффектов низкоинтенсивного облучения при испытаниях необходимо объединять методы, используемые для моделирования TDE и TDRE. В частности, процедуры ускоренных испытаний, применяемые для биполярных изделий (облучение при мощности дозы не более 0,01 рад(Si)/с или облучение при повышенной температуре), могут быть дополнены этапом последующего высокотемпературного отжига, как это делается в случае МОП- и КМОП-приборов. Однако этот вопрос требует дополнительной проработки.

Помимо рассмотренных методов испытаний, практически все стандарты и руководства допускают проведение облучений исследуемых приборов при мощности дозы, соответствующей предполагаемым условиям применения на борту космических аппаратов. Однако такие эксперименты будут очень длительными, и такой подход нельзя рассматривать как метод ускоренных испытаний.

### Заключение

Рассмотрены особенности деградации приборов на базе кремния и микросхем вследствие дозовых ионизационных эффектов с учетом специфики длительного низкоинтенсивного облучения, характерного для применения в условиях космического пространства. Данная специфика может определяться как зависимыми от времени эффектами (что в большей степени характерно для приборов и микросхем МОП- и КМОП-технологии), так и истинными эффектами мощности дозы (что обычно характерно для изделий биполярной технологии).

Несмотря на то, что исследования по данной тематике ведутся уже достаточно давно, полного понимания физических процессов, вызывающих возникновение наблюдаемых эффектов низкоинтенсивного облучения, до сих пор нет. Особенно это касается механизмов радиационно-индуцированного накопления поверхностных состояний, которые во многом (если не полностью) определяют эффект ELDRS в биполярных изделиях. По этой причине исследования в данной области до сих пор не утратили своей актуальности.

Среди экспериментальных методов моделирования эффектов низкоинтенсивного облучения наиболее распространенными являются методы «облучение—отжиг», применяемые для МОП- и КМОП-приборов, а также методы облучения при мощности дозы не выше 0,01 рад(Si)/с и облучения при высокой температуре, применяемые для биполярных изделий. Следует отметить, что данные методы разрабатывались на основе обобщения большого количества экспериментальных данных, и отражают особенности деградации, наблюдаемые для большинства изделий из своего технологического класса. Однако всегда имеются какие-то представ-

ители, радиационный отклик которых отличается от наблюдаемого для большинства представителей своего класса. По этой причине, при испытаниях рекомендуется проводить предварительные исследования, направленные на выявление особенностей эффектов низкоинтенсивного облучения для конкретного испытываемого прибора. В случае обнаружения существенных отклонений отклика прибора от наблюдаемого для большинства представителей своего технологического класса необходимо вносить корректировки в применяемые процедуры и режимы испытаний, чтобы получаемые результаты корректно отражали особенности деградации данного прибора в предполагаемых условиях применения на борту космического аппарата.

### Библиографический список

1. **Barth, J. L.** Applying computer simulation tools to radiation effects problems / J. L. Barth // IEEE NSREC. Short Course Notes. Section I. Modeling space radiation environments. – Snowmass Village (CO, USA), 1997. – P. I-1—I-83.
2. **Stassinopoulos, E. G.** The space radiation environment for electronics / E. G. Stassinopoulos, J. P. Raymond // Proc. IEEE. – 1988. – V. 76, N 11. – P. 1423—1442.
3. **Srouf, J. R.** Radiation effects on microelectronics in space / J. R. Srouf, J. M. McGarrity // Proc. IEEE. – 1988. – V. 76, N 11. – P. 1443—1469.
4. **Таперо, К. И.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012.
5. **Таперо, К. И.** Основы радиационной стойкости изделий электронной техники: радиационные эффекты в изделиях электронной техники: учеб. пособие / К. И. Таперо, С. И. Диденко. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2013.
6. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.
7. **Schwank, J. R.** Total dose effects in MOS devices / J. R. Schwank // IEEE NSREC. Short Course Notes. – Phoenix (Arizona, USA), 2002. – P. III-1 — III-123.
8. **Helms, C. R.** The silicon — silicon-dioxide system: its microstructure and imperfections / C. R. Helms, E. H. Poindexter // Rep. Prog. Phys. – 1994. – N 57. – P. 791—852.
9. **Lenahan, P. M.** Hole traps and trivalent silicon centers in metal/oxide/silicon devices / P. M. Lenahan, P. V. Dressendorfer // J. Appl. Phys. – 1984. – V. 55, N 10. – P. 3495—2499.
10. **Warren, W. L.** Paramagnetic defect centers in BESOI and SIMOX buried oxides / W. L. Warren, M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, R. A. B. Devine, W. P. Maszara, J. B. McKitterick // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1993. – V. 40, N 6. – P. 1755—1764. DOI: 10.1109/23.273482
11. **Conley, J. F.** Electron spin resonance study of E' trapping centers in SIMOX buried oxides / J. F. Conley, P. M. Lenahan, P. Roitman // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1991. – V. 38, N 6. – P. 1247—1252.
12. **Herve, D.** Comparative study of radiation-induced electrical and spin active defects in buried SiO<sub>2</sub> layers / D. Herve, J. L. Leray, R. A. B. Devine // J. Appl. Phys. – 1992. – V. 72, N 8. – P. 3634—3640. DOI: 10.1063/1.352306
13. **Boesch (Jr.), H. E.** Time-dependent radiation-induced charge effects in wafer-bonded SOI buried oxides / H. E. Boesch (Jr.), T. L. Taylor // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1992. – V. 39, N 6. – P. 2103—2113.
14. **Boesch (Jr.), H. E.** Time-dependent hole and electron trapping effects in SIMOX buried oxides / H. E. Boesch, Jr., T. L. Taylor, L. R. Hite, W. E. Bailey // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1990. – V. 37, N 6. – P. 1982—1989
15. **Stahlbush, R. E.** Electron and hole trapping in irradiated SIMOX, ZMR, and BESOI buried oxides / R. E. Stahlbush, G. J. Campisi, J. B. McKitterick, W. P. Maszara, P. Roitman, G. A. Brown // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1992. – V. 39, N 6. – P. 2086—2097. DOI: 10.1109/23.211407

16. **Winokur, P. S.** Two-stage process for buildup of radiation-induced interface states / P. S. Winokur, H. E. Boesch (Jr.), J. M. McGarrity, F. B. McLean // *J. Appl. Phys.* – 1979. – V. 50, N 5. – P. 3492–3495.
17. **McLean, F. B.** A framework for understanding radiation-induced interface states in SiO<sub>2</sub> MOS structures / F. B. McLean // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1980. – V. 27, N 6. – P. 1651–1657.
18. **Shaneyfelt, M. R.** Interface trap buildup rates in wet and dry oxides / M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, K. L. Hughes, G. L. Hash, M. P. Connors // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1992. – V. 39, N 6. – P. 2244–2251. DOI: 10.1109/23.211427
19. **Schwank, J. R.** Radiation-induced interface-state generation in MOS devices / J. R. Schwank, P. S. Winokur, F. W. Sexton, D. M. Fleetwood, J. H. Perry, P. V. Dressendorfer, D. T. Sanders, D. C. Turpin // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1986. – V. 33, N 6. – P. 1177–1184.
20. **Saks, N. S.** Time dependence of interface trap formation in MOSFETs following pulsed irradiation / N. S. Saks, C. M. Dozier, D. B. Brown // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1988. – V. 35, N 6. – P. 1168–1177.
21. **Boesch (Jr.), H. E.** Time-dependent interface trap effects in MOS devices / H. E. Boesch (Jr.) // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1988. – V. 35, N 6. – P. 1160–1167.
22. **Lenahan, P. M.** Radiation-induced trivalent silicon defect buildup at the Si–SiO<sub>2</sub> interface in MOS structures / P. M. Lenahan, K. L. Brower, P. V. Dressendorfer, W. C. Johnson // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1981. – V. 28, N 6. – P. 4105–4106.
23. **Lenahan, P. M.** An electron spin resonance study of radiation-induced electrically active paramagnetic centers at the Si/SiO<sub>2</sub> interface / P. M. Lenahan, P. V. Dressendorfer // *J. Appl. Phys.* – 1983. – V. 54, N 3. – P. 1457–1460.
24. **Poindexter, E. H.** Interface states and electron spin resonance centers in thermally oxidized (111) and (100) silicon wafers / E. H. Poindexter, P. J. Caplan, B. E. Deal, R. R. Razouk // *J. Appl. Phys.* – 1981. – V. 52, N 2. – P. 879–884.
25. **Gerardi, G. J.** Interface traps and P<sub>b</sub> centers in oxidized (100) silicon wafers / G. J. Gerardi, E. H. Poindexter, P. J. Caplan, N. M. Johnson // *Appl. Phys. Lett.* – 1986. – V. 49, N 6. – P. 348–350.
26. **Pease, R. L.** ELDRS in bipolar linear circuits: a review / R. L. Pease, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2009. – V. 56, N 6. – P. 1894–1908.
27. **Согоян, А. В.** Особенности пострадиационных релаксационных процессов в КНС ИС / А. В. Согоян, Г. Г. Давыдов // *Радиационная стойкость электронных систем.* – 2005. – Вып. 8. – С. 49–50.
28. **Shaneyfelt, M. R.** Thermal-stress effects and enhanced low dose rate sensitivity in linear bipolar ICs / M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, J. R. Witzcak, D. M. Fleetwood, R. L. Pease, P. S. Winokur, L. C. Riewe, G. L. Hash // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2000. – V. 47, N 6. – P. 2539–2545. DOI: 10.1109/23.903805
29. **Boesch (Jr.), H. E.** Temperature- and field-dependent charge relaxation in SiO<sub>2</sub> gate insulators / H. E. Boesch (Jr.), J. M. McGarrity, F. B. McLean // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1978. – V. 25, N 3. – P. 1012–1016.
30. **Boesch (Jr.), H. E.** Enhanced flatband voltage recovery in hardened thin MOS capacitors / H. E. Boesch (Jr.), F. B. McLean, J. M. McGarrity, P. S. Winokur // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1978. – V. 25, N 6. – P. 1239–1245.
31. **Fleetwood, D. M.** Using laboratory X-ray and Co-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments / D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, J. R. Schwank // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1988. – V. 35, N 6. – P. 1497–1505.
32. **Schwank, J. R.** Physical mechanisms contributing to device «Rebound» / J. R. Schwank, P. S. Winokur, P. J. McWhorter, F. W. Sexton, P. V. Dressendorfer, D. C. Turpin // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1984. – V. 31, N 6. – P. 1434–1438.
33. **Derbenwick, G. F.** CMOS hardness for low-dose-rate environments / G. F. Derbenwick, H. H. Sander // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1977. – V. 24, N 6. – P. 2244–2247.
34. **Leleis, A. J.** Reversibility of trapped hole charge / A. J. Leleis, H. E. Boesch, Jr., T. R. Oldham, F. B. McLean // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1988. – V. 35, N 6. – P. 1186–1191.
35. **Fleetwood, D. M.** The role of border traps in MOS high-temperature postirradiation annealing response / D. M. Fleetwood, M. R. Shaneyfelt, L. C. Riewe, P. S. Winokur, R. A. Reber // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1993. – V. 40, N 6. – P. 1323–1334. DOI: 10.1109/23.273535
36. **McWhorter, P. J.** Modeling the anneal of radiation-induced trapped holes in a varying thermal environment / P. J. McWhorter, S. L. Miller, W. M. Miller // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1990. – V. 37, N 6. – P. 1682–1689.
37. **Oldham, T. R.** Spatial dependence of trapped holes determined from tunneling analysis and measured annealing / T. R. Oldham, A. J. Leleis, F. B. McLean // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1986. – V. 33, N 6. – P. 1203–1209.
38. **McWhorter, P. J.** Modeling the memory retention characteristics of SNOS transistors in a varying thermal environment / P. J. McWhorter, S. L. Miller, T. A. Dellin // *J. Appl. Phys.* – 1990. – V. 68, N 4. – P. 1902–1908.
39. **Leleis, A. J.** Response of interface traps during high-temperature anneals / A. J. Leleis, T. R. Oldham, W. M. DeLancey // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1991. – V. 38, N 6. – P. 1590–1597.
40. **Fleetwood, D. M.** High-temperature silicon-on-insulator electronics for space nuclear power systems: requirements and feasibility / D. M. Fleetwood, F. V. Thome, S. S. Tsao, P. V. Dressendorfer, V. J. Dandini, J. R. Schwank // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1988. – V. 35, N 5. – P. 1099–1112. DOI: 10.1109/23.7506
41. **Winokur, P. S.** Total-dose radiation and annealing studies: implications for hardness assurance testing / P. S. Winokur, F. W. Sexton, J. R. Schwank, D. M. Fleetwood, P. V. Dressendorfer, T. F. Wrobel, D. C. Turpin // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1986. – V. 33, N 6. – P. 1343–1351. DOI: 10.1109/TNS.1986.4334603
42. **Jonston, A. H.** Super recovery of total dose damage in MOS devices / A. H. Jonston // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1984. – V. 31, N 6. – P. 1427–1433.
43. **Schrimpf, R. D.** Physics and hardness assurance for bipolar technologies / R. D. Schrimpf // *IEEE NSREC Short Course*, 2001. – P. IV-1–IV-67.
44. **Enlow, E. W.** Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation / E. W. Enlow, R. L. Pease, W. E. Combs, R. D. Schrimpf, R. N. Nowlin // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1991. – V. 38, N 6. – P. 1342–1351. DOI: 10.1109/23.124115
45. **McClure, S.** Dependence of total dose response of bipolar linear micro-circuits on applied dose rate / S. McClure, R. L. Pease, W. Will, G. Perry // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1994. – V. 41, N 6. – P. 2544–2549.
46. **Johnston, A. H.** Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits / A. H. Johnston, G. M. Swift, B. G. Rax // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1994. – V. 41, N 6. – P. 2427–2436.
47. **Beaucour, J. T.** Total dose effects on negative voltage regulator / J. T. Beaucour, T. Carriere, A. Gach, D. Laxague // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1994. – V. 41, N 6. – P. 2420–2426. DOI: 10.1109/23.340597
48. **Chen, X. Jie** Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies / X. Jie Chen, H. J. Barnaby, P. Adell, R. L. Pease, B. Vermeire, K. E. Holbert // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2009. – V. 56, N 6. – P. 3196–3202. DOI: 10.1109/TNS.2009.2034154
49. **Tapero, K. I.** Comparison of irradiation at low dose rate and irradiation at elevated temperature to reveal ELDRS in bipolar linear circuits / K. I. Tapero, A. S. Petrov, V. N. Ulimov, P. A. Chubunov, V. S. Anashin // 15th European Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). – Moscow, 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365593
50. **Johnston, A. H.** Enhanced damage in bipolar devices at low dose rates: effects at very low dose rates / A. H. Johnston, C. I. Lee, B. G. Rax // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1996. – V. 43, N 6. – P. 3049–3059.
51. **Witzcak, S. C.** Accelerated tests for simulating low dose rate gain degradation of lateral and substrate pnp bipolar junction transistors / S. C. Witzcak, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway, D. M. Fleetwood, R. L. Pease, J. M. Puhl, D. M. Schmidt, W. E. Combs, J. S. Suehle // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1996. – V. 43, N 6. – P. 3151–3160. DOI: 10.1109/23.556919
52. **Романенко, А. А.** Влияние ионизирующего излучения низкой интенсивности на биполярные изделия электронной техники / А. А. Романенко // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру.* – 2002. – Вып. 4. – С. 121–132.
53. **Fleetwood, D. M.** Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates / D. M. Fleetwood, S. L. Kosier, R. N. Nowlin, R. D. Schrimpf, R. A. Reber, M. DeLaus, P. S. Winokur, A. Wei, W. E. Combs, R. L. Pease // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1994. – V. 41, N 6. – P. 1871–1883. DOI: 10.1109/23.340519

54. **Fleetwood, D. M.** Radiation effects at low electric fields in thermal, SIMOX, and bipolar–base oxides / D. M. Fleetwood, L. C. Reiw, J. R. Schwank, S. C. Witzczak, R. D. Schrimpf // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1996. – V. 43, N 6. – P. 2537–2546. DOI: 10.1109/23.556834
55. **Witzczak, S. C.** Space charge limited degradation of bipolar oxides at low electric fields / S. C. Witzczak, R. C. Laco, D. C. Mayer, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1998. – V. 45, N 6. – P. 2339–2351. DOI: 10.1109/23.736453
56. **Graves, R. J.** Modeling low–dose–rate effects in irradiated bipolar–base oxides / R. J. Graves, C. R. Cirba, R. D. Schrimpf, R. J. Milanowski, A. Michez, D. M. Fleetwood, S. C. Witzczak, F. Saigne // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1998. – V. 45, N 6. – P. 2352–2360. DOI: 10.1109/23.736454
57. **Rashkeev, S. N.** Physical model for enhanced interface–trap formation at low dose rates / N. Rashkeev, C. R. Cirba, D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, S. C. Witzczak, A. Michez, S. T. Pantelides // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2002. – V. 49, N 6. – P. 2650–2655. DOI: 10.1109/TNS.2002.805387
58. **Hjalmarson, H. P.** Mechanisms for radiation dose–rate sensitivity of bipolar transistors / H. P. Hjalmarson, R. L. Pease, S. C. Witzczak, M. R. Shaneyfelt, J. R. Schwank, A. H. Edwards, C. E. Hembree, T. R. Mattsson // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2003. – V. 50, N 6. – P. 1901–1909. DOI: 10.1109/TNS.2003.821803
59. **Tsetseris, L.** Common origin for enhanced low–dose–rate sensitivity and bias temperature instability under negative bias / L. Tsetseris, R. D. Schrimpf, D. M. Fleetwood, R. L. Pease, S. T. Pantelides // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2005. – V. 52, N 6. – P. 2265–2271. DOI: 10.1109/TNS.2005.860670
60. **Boch, J.** Dose rate effects in bipolar oxides: Competition between trap filling and recombination / J. Boch, F. Saigne, A. D. Touboul, S. Ducret, J.–F. Carloti, M. Bernard, R. D. Schrimpf, F. Wrobel, G. Sarrabayrouse // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – V. 88. – P. 232113. DOI: 10.1063/1.2210293
61. **Boch, J.** Physical model for low–dose–rate effect in bipolar devices / J. Boch, F. Saigne, R. D. Schrimpf, J.–R. Vaill, L. Dusseau, E. Lorfvre // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2006. – V. 53, N 6. – P. 3655–3660. DOI: 10.1109/TNS.2006.886008
62. **Fleetwood, D. M.** Electron capture, hydrogen release and enhanced gain degradation in bipolar linear devices / D. M. Fleetwood, R. D. Schrimpf, S. T. Pantelides, R. L. Pease, G. W. Dunham // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2008. – V. 55, N 6. – P. 2986–2991. DOI: 10.1109/TNS.2008.2006485
63. **Hjalmarson, H. P.** Calculations of radiation dose–rate sensitivity of bipolar transistors / H. P. Hjalmarson, R. L. Pease, R. Devine // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2008. – V. 55, N 6. – P. 3009–3015.
64. **Belyakov, V. S.** Use of MOS structures for the investigation of low–dose–rate effects in bipolar transistors / V. S. Belyakov, V. S. Pershenkov, A. V. Shalnov, I. N. Shvetzov–Shilovsky // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1995. – V. 42, N 6. – P. 1660–1666.
65. **Freitag, R. K.** Study of low–dose–rate effects in commercial linear bipolar ICs / R. K. Freitag, D. B. Brown // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1998. – V. 45, N 6. – P. 2649–2658.
66. **Petrov, A. S.** Influence of temperature and dose rate on the degradation of BiCMOS operational amplifiers during total ionizing dose testing / A. S. Petrov, K. I. Tapero, V. N. Ulimov // *Microelectronics Reliability*, 2014. – V. 54. – P. 1745–1748.
67. **Tapero, K. I.** Dose effects in CMOS operational amplifiers with bipolar and CMOS input stage at different dose rates and temperatures / K. I. Tapero, A. S. Petrov, P. A. Chubunov, V. N. Ulimov, V. S. Anashin // 15th European Conf. on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). – Moscow, 2015. – P. 1–4. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365602

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2016, vol. 19, no. 1, pp. 5–21.

## Low dose rate effects in silicon based devices and integrated circuits: a review

K. I. Tapero<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Federal State Unitary Enterprise «Research Institute of Scientific Instruments»  
8, Turayev, Lytkarino, Moscow region, 140080, Russian Federation*

<sup>2</sup>*National University of Science and Technology MISIS,  
4, Leninskiy prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation*

**Abstract.** This paper is a review on total ionizing dose effects in silicon semiconductor devices and integrated circuits under low dose rate irradiation that is typical of space applications. We consider the mechanism of radiation induced charge buildup in the dielectric of MOS structures and at the semiconductor/dielectric interface; in addition, the paper reports an analysis of the nature of defects in Si/SiO<sub>2</sub> structure which are responsible for these processes. Also, the paper describes specific features of annealing of the charge trapped in dielectric and interface traps.

The degradation of MOS and bipolar devices is considered for low dose rate irradiation conditions inherent to space application. We show that under low dose rate irradiation MOS devices are susceptible to time–dependent effects which are determined by the kinetics of charge buildup and annealing in the Si/SiO<sub>2</sub> structure, while bipolar devices may be susceptible to true dose rate effects.

The paper considers basic experimental modeling methods for low dose rate effects during accelerated testing of silicon devices and integrated circuits. We show that it is necessary to use essentially different experimental approaches for the modeling of time–dependent effects in MOS devices and true dose rate effects in bipolar devices and integrated circuits.

**Keywords:** semiconductor devices, integrated circuits, total ionizing dose effects, ionizing radiation, low dose rate effects, radiation hardness.

### Information about authors:

**Konstatntin I. Tapero**<sup>1,2</sup> — Cand. Sci. (Phys.–Math.) (1), Associate Professor (2) (tapero@bk.ru).

### References

- Barth J. L. Applying computer simulation tools to radiation effects problems. *IEEE NSREC. Short Course Notes*. Snowmass Village (CO, USA), 1997, pp. I–1–I–83.
- Stassinopoulos E. G., Raymond J. P. The space radiation environment for electronics. *Proc. IEEE*, 1988, 76(11), pp. 1423–1442.
- Srouf J. R., McGarrity J. M. Radiation effects on microelectronics in space, *Proc. IEEE*, 1988, 76(11). P. 1443–1469.
- Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiatsionnye efekty v kremnievykh integral'nykh skhemakh kosmicheskogo primeneniya* [Radiation effects in silicon integrated circuits for space application]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012. (In Russ.)
- Tapero K. I., Didenko S. I. *Osnovy radiatsionnoi stoikosti izdelii elektronnoi tekhniki: radiatsionnye efekty v izdeliyakh elektronnoi tekhniki: ucheb. posobie* [Fundamentals of radiation resistance of electronic products: Radiation Effects in Electronic products]. Moscow: Izd. dom MISiS, 2013. (In Russ.)
- Ioniziruyushchie izlucheniya kosmicheskogo prostranstva i ikh vozdeistvie na bortovuyu apparaturu kosmicheskikh apparatov* [Ionizing radiation of outer space and their impact on the on–board equipment of spacecrafts]. Moscow: FIZMATLIT, 2013. (In Russ.)
- Schwank J. R. Total dose effects in MOS devices. *IEEE NSREC Short Course Notes*, 2002, pp. III–1 — III–123.
- Helms C. R., Poindexter E. H. The silicon — silicon–dioxide system: its microstructure and imperfections. *Rep. Prog. Phys.*, 1994, no. 57, pp. 791–852.
- Lenahan P. M., Dressendorfer P. V. Hole traps and trivalent silicon centers in metal/oxide/silicon devices. *J. Appl. Phys.*, 1984, vol. 55, no. 10, pp. 3495–2499.
- Warren W. L., Shaneyfelt M. R., Schwank J. R., Fleetwood D. M., Winokur P. S., Devine R. A. B., Maszara W. P., McKitterick J. B. Paramagnetic defect centers in BESOI and SIMOX buried ox-

- ides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, vol. 40, no. 6, pp. 1755–1764. DOI: 10.1109/23.273482
11. Conley J. F., Lenahan P. M., Roitman P. Electron spin resonance study of E' trapping centers in SIMOX buried oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1991, vol. 38, no. 6, pp. 1247–1252.
  12. Herve D., Leray J. L., Devine R. A. B. comparative study of radiation-induced electrical and spin active defects in buried SiO<sub>2</sub> layers. *J. Appl. Phys.*, 1992, vol. 72, no. 8, pp. 3634–3640.
  13. Boesch H. E. (Jr.), Taylor T. L. Time-dependent radiation-induced charge effects in wafer-bonded SOI buried oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, vol. 39, no. 6, pp. 2103–2113.
  14. Boesch H. E. (Jr.), Taylor T. L., Hite L. R., Bailey W. E. Time-dependent hole and electron trapping effects in SIMOX buried oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1990, vol. 37, no. 6, pp. 1982–1989.
  15. Stahlbush R. E., Campisi G. J., McKitterick J. B., Maszara W. P., Roitman P., Brown G. A. Electron and hole trapping in irradiated SIMOX, ZMR, and BESOI buried oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, vol. 39, no. 6, pp. 2086–2097. DOI: 10.1109/23.211407
  16. Winokur P. S., Boesch H. E. (Jr.), McGarrity J. M., McLean F. B. Two-stage process for buildup of radiation-induced interface states. *J. Appl. Phys.*, 1979, vol. 50, no. 5, pp. 3492–3495.
  17. McLean F. B. A framework for understanding radiation-induced interface states in SiO<sub>2</sub> MOS structures. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1980, vol. 27, no. 6, pp. 1651–1657.
  18. Shaneyfelt M. R., Schwank J. R., Fleetwood D. M., Winokur P. S., Hughes K. L., Hash G. L., Connors M. P. Interface trap buildup rates in wet and dry oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, vol. 39, no. 6, pp. 2244–2251. DOI: 10.1109/23.211427
  19. Schwank J. R., Winokur P. S., Sexton F. W., Fleetwood D. M., Perry J. H., Dressendorfer P. V., Sanders D. T., Turpin D. C. Radiation-induced interface-state generation in MOS devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1986, vol. 33, no. 6, pp. 1177–1184.
  20. Saks N. S., Dozier C. M., Brown D. B., Time dependence of interface trap formation in MOSFETs following pulsed irradiation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 6, pp. 1168–1177.
  21. Boesch H. E. (Jr.), Time-dependent interface trap effects in MOS devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 6, pp. 1160–1167.
  22. Lenahan P. M., Brower K. L., Dressendorfer P. V., Johnson W. C. Radiation-induced trivalent silicon defect buildup at the Si-SiO<sub>2</sub> interface in MOS structures. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1981, vol. 28, no. 6, pp. 4105–4106.
  23. Lenahan P. M., Dressendorfer P. V. An electron spin resonance study of radiation-induced electrically active paramagnetic centers at the Si/SiO<sub>2</sub> interface. *J. Appl. Phys.*, 1983, vol. 54, no. 3, pp. 1457–1460.
  24. Poindexter E. H., Caplan P. J., Deal B. E., Razouk R. R. Interface states and electron spin resonance centers in thermally oxidized (111) and (100) silicon wafers. *J. Appl. Phys.*, 1981, vol. 52, no. 2, pp. 879–884.
  25. Gerardi G. J., Poindexter E. H., Caplan P. J., Johnson N. M. Interface traps and P<sub>b</sub> centers in oxidized (100) silicon wafers. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, vol. 49, no. 6, pp. 348–350.
  26. Pease R. L., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M. ELDRS in bipolar linear circuits: a review. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 1894–1908.
  27. Согоян А. В., Давыдов Г. Г. Особенности пострадиационных релаксационных процессов в КНС ИС // Н.-техн. сб. «Радиационная стойкость электронных систем». 2005. Вып. 8. С. 49–50. (In Russ.)
  28. Shaneyfelt M. R., Schwank J. R., Witzczak J. R., Fleetwood D. M., Pease R. L., Winokur P. S., Riewe L. C., Hash G. L. Thermal-stress effects and enhanced low dose rate sensitivity in linear bipolar ICs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, vol. 47, no. 6, pp. 2539–2545. DOI: 10.1109/23.903805
  29. Boesch H. E. (Jr.), McGarrity J. M., McLean F. B. Temperature- and field-dependent charge relaxation in SiO<sub>2</sub> gate insulators. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1978, vol. 25, no. 3, pp. 1012–1016.
  30. Boesch H. E. (Jr.), McLean F. B., McGarrity J. M., Winokur P. S. Enhanced flatband voltage recovery in hardened thin MOS capacitors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1978, vol. 25, no. 6, pp. 1239–1245.
  31. Fleetwood D. M., Winokur P. S., Schwank J. R. Using laboratory X-ray and Co-60 irradiations to predict CMOS device response in strategic and space environments. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 6, pp. 1497–1505.
  32. Schwank J. R., Winokur P. S., McWhorter P. J., Sexton F. W., Dressendorfer P. V., Turpin D. C. Physical mechanisms contributing to device «Rebound». *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1984, vol. 31, no. 6, pp. 1434–1438.
  33. Derbenwick G. F., Sander H. H. CMOS hardness for low-dose-rate environments. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1977, vol. 24, no. 6, pp. 2244–2247.
  34. Lelis A. J., Boesch H. E. (Jr.), Oldham T. R., McLean F. B. Reversibility of trapped hole charge. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 6, pp. 1186–1191.
  35. Fleetwood D. M., Shaneyfelt M. R., Reiwe L. C., Winokur P. S., Reber R. A. The role of border traps in MOS high-temperature postirradiation annealing response. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, vol. 40, no. 6, pp. 1323–1334. DOI: 10.1109/23.273535
  36. McWhorter P. J., Miller S. L., Miller W. M. Modeling the anneal of radiation-induced trapped holes in a varying thermal environment. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1990, vol. 37, no. 6, pp. 1682–1689.
  37. Oldham T. R., Lelis A. J., McLean F. B., Spatial dependence of trapped holes determined from tunneling analysis and measured annealing. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1986, vol. 33, no. 6, pp. 1203–1209.
  38. McWhorter P. J., Miller S. L., Dellin T. A. Modeling the memory retention characteristics of SNOS transistors in a varying thermal environment. *J. Appl. Phys.*, 1990, vol. 68, no. 4, pp. 1902–1908.
  39. Lelis A. J., Oldham T. R., DeLancey W. M., Response of interface traps during high-temperature anneals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1991, vol. 38, no. 6, pp. 1590–1597.
  40. Fleetwood D. M., Thome F. V., Tsao S. S., Dressendorfer P. V., Dandini V. J., Schwank J. R. High-temperature silicon-on-insulator electronics for space nuclear power systems: requirements and feasibility. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, vol. 35, no. 5, pp. 1099–1112. DOI: 10.1109/23.7506
  41. Winokur P. S., Sexton F. W., Schwank J. R., Fleetwood D. M., Dressendorfer P. V., Wrobel T. F., Turpin D. C. Total-dose radiation and annealing studies: implications for hardness assurance testing. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1986, vol. 33, no. 6, pp. 1343–1351. DOI: 10.1109/TNS.1986.4334603
  42. Jonston A. H., Super recovery of total dose damage in MOS devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1984, vol. 31, no. 6, pp. 1427–1433.
  43. Schrimpf R. D. Physics and hardness assurance for bipolar technologies. *IEEE NSREC Short Course*, 2001, pp. IV-1–IV-67.
  44. Enlow E. W., Pease R. L., Combs W. E., Schrimpf R. D., Nowlin R. N. Response of advanced bipolar processes to ionizing radiation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1991, vol. 38, no. 6, pp. 1342–1351. DOI: 10.1109/23.124115
  45. McClure S., Pease R. L., Will W., Perry G. Dependence of total dose response of bipolar linear micro-circuits on applied dose rate. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, vol. 41, no. 6, pp. 2544–2549.
  46. Johnston A. H., Swift G. M., Rax B. G. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, vol. 41, no. 6, pp. 2427–2436.
  47. Beaucoeur J. T., Carriere T., Gach A., Laxague D. Total dose effects on negative voltage regulator. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, vol. 41, no. 6, pp. 2420–2426. DOI: 10.1109/23.340597
  48. Jie Chen X., Barnaby H. J., Adell P., Pease R. L., Vermeire B., Holbert K. E. Modeling the dose rate response and the effects of hydrogen in bipolar technologies. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 3196–3202. DOI: 10.1109/TNS.2009.2034154
  49. Tapero K. I., Petrov A. S., Ulimov V. N., Chubunov P. A., Anashin V. S. Comparison of irradiation at low dose rate and irradiation at elevated temperature to reveal ELDRS in bipolar linear circuits. 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Moscow, 2015 P. 1–5. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365593
  50. Johnston A. H., Lee C. I., Rax B. G. Enhanced damage in bipolar devices at low dose rates: effects at very low dose rates. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, vol. 43, no. 6, pp. 3049–3059.
  51. Witzczak S. C., Schrimpf R. D., Galloway K. F., Fleetwood D. M., Pease R. L., Puhl J. M., Schmidt D. M., Combs W. E., Suehle J. S. Accelerated tests for simulating low dose rate gain degradation of lateral and substrate pnp bipolar junction transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, vol. 43, no. 6, pp. 3151–3160. DOI: 10.1109/23.556919
  52. Романенко А. А. Влияние ионизирующего излучения низкой интенсивности на биполярные изделия электронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 4. – С. 121–132. (In Russ.)
  53. Fleetwood D. M., Kosier S. L., Nowlin R. N., Schrimpf R. D., Reber R. A., DeLaus M., Winokur P. S., Wei A., Combs W. E., Pease R. L. Physical mechanisms contributing to enhanced bipo-

- lar gain degradation at low dose rates. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, vol. 41, no. 6, pp. 1871—1883. DOI: 10.1109/23.340519
54. Fleetwood D. M., Reiwe L. C., Schwank J. R., Witzcak S. C., Schrimpf R. D. Radiation effects at low electric fields in thermal, Si-MOX, and bipolar-base oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, vol. 43, no. 6, pp. 2537—2546. DOI: 10.1109/23.556834
55. Witzcak S. C., Lacoce R. C., Mayer D. C., Fleetwood D. M., Schrimpf R. D., Galloway K. F. Space charge limited degradation of bipolar oxides at low electric fields. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1998, vol. 45, no. 6, pp. 2339—2351. DOI: 10.1109/23.736453
56. Graves R. J., Cirba C. R., Schrimpf R. D., Milanowski R. J., Michez A., Fleetwood D. M., Witzcak S. C., Saigne F. Modeling low-dose-rate effects in irradiated bipolar-base oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1998, vol. 45, no. 6, pp. 2352—2360. DOI: 10.1109/23.736454
57. Rashkeev S. N., Cirba C. R., Fleetwood D. M., Schrimpf R. D., Witzcak S. C., Michez A., Pantelides S. T. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2002, vol. 49, no. 6, pp. 2650—2655. DOI: 10.1109/TNS.2002.805387
58. Hjalmarson H. P., Pease R. L., Witzcak S. C., Shaneyfelt M. R., Schwank J. R., Edwards A. H., Hembree C. E., Mattsson T. R. Mechanisms for radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, vol. 50, no. 6, pp. 1901—1909. DOI: 10.1109/TNS.2003.821803
59. Tsetseris L., Schrimpf R. D., Fleetwood D. M., Pease R. L., Pantelides S. T. Common origin for enhanced low-dose-rate sensitivity and bias temperature instability under negative bias. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2005, vol. 52, no. 6, pp. 2265—2271. DOI: 10.1109/TNS.2005.860670
60. Boch J., Saigne F., Touboul A. D., Ducret S., Carlotti J.-F., Bernard M., Schrimpf R. D., Wrobel F., Sarabayrouse G. Dose rate effects in bipolar oxides: Competition between trap filling and recombination. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 88, 232113. DOI: 10.1063/1.2210293
61. Boch J., Saigne F., Schrimpf R. D., Vaill J.-R., Dusseau L., Lorfvre E. Physical model for low-dose-rate effect in bipolar devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2006, vol. 53, no. 6, pp. 3655—3660. DOI: 10.1109/TNS.2006.886008
62. Fleetwood D. M., Schrimpf R. D., Pantelides S. T., Pease R. L., Dunham G. W. Electron capture, hydrogen release and enhanced gain degradation in bipolar linear devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, vol. 55, no. 6, pp. 2986—2991. DOI: 10.1109/TNS.2008.2006485
63. Hjalmarson H. P., Pease R. L., Devine R. Calculations of radiation dose-rate sensitivity of bipolar transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2008, vol. 55, no. 6, pp. 3009—3015.
64. Belyakov V. S., Pershenkov V. S., Shalnov A. V., Shvetzov-Shilovsky I. N. Use of MOS structures for the investigation of low-dose-rate effects in bipolar transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1995, vol. 42, no. 6, pp. 1660—1666.
65. Freitag R. K., Brown D. B. Study of low-dose-rate effects in commercial linear bipolar ICs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1998, vol. 45, no. 6, pp. 2649—2658.
66. Petrov A. S., Tapero K. I., Ulimov V. N. Influence of temperature and dose rate on the degradation of BiCMOS operational amplifiers during total ionizing dose testing. *Microelectronics Reliability*, 2014, vol. 54, pp. 1745—1748.
67. Tapero K. I., Petrov A. S., Chubunov P. A., Ulimov V. N., Anashin V. S. Dose effects in CMOS operational amplifiers with bipolar and CMOS input stage at different dose rates and temperatures, 15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS) Moscow, 2015. P. 1—4. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365602

\* \* \*