УДК 621.315.592.9

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ

Ерошкин А.Л., Попо Р.А.

Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА). Москва, e-mail: ieroshkin.a@mail.ru, radpo@yandex.ru

Российская атомная, космическая, военная промышленность и медицинская электроника испытывают потребность в высоконадежной элементной базе, устойчивой к радиационным воздействиям. В работе обсуждаются вопросы, связанные с обеспечением радиационной стойкости микросхем, современных технических систем, использующих элементную базу, изготовленную по разным технологиям.

Ключевые слова: надежность, радиационная стойкость, интегральная схема

EVALUATION OF RELIABILITY SEMICONDUCTOR DEVICES AND MICROCIRCUITS

¹Eroshkin A.L., ²Popo R.A.

Moscow State University of Information Technologies, Radio Engineering and Electronics (MIREA), Moscow, e-mail: ieroshkin.a@mail.ru, radpo@yandex.ru

Russian nuclear, aerospace, military and medical electronics industries have a need for highly reliable element base that is resistant to radiation. The paper discusses the issues related to radiation resistance chips, advanced technical systems that use the element base, made by different technologies.

Keywords: reliability, radiation resistance, integrated circuit

Известно, что надёжность современных интегральных схем (ИС) в значительной степени определяется плотностью и характером распределения структурных дефектов в исходных пластинах полупроводниковых материалов. Вариации плотности дефектов по площади и объему пластин непосредственно влияют на изменение электрофизических свойств и во многом определяют деградационные свойства готовых изделий и их надежность.

Несмотря на успехи, достигнутые в методах получения материалов для полупроводниковой электроники, эффективность управления их свойствами еще недостаточна.

Дефекты кристаллической структуры в кремнии можно разделить на две большие группы: «ростовые», возникающие на стадиях роста и выращивания эпитаксиального слоя на пластине, и технологически вносимые, которые в свою очередь подразделяются на:

- «первичные» дефекты, появляющиеся при механической обработке пластин за счет разрушения и пластической деформации;
- «вторичные» дефекты, возникающие на «ростовых» и «первичных» дефектах при высокотемпературных технологических процессах в результате появления внешних и внутренних напряжений.

К «ростовым» дефектам относятся дислокации и дислокационные петли, линии скольжения, двойники, дефекты упаковки,

кластеры (скопления вакансий), микропреципитаты примесей, микровключения легирующих примесей.

«Технологически вносимые» – это дефекты, возникающие:

- в процессе механической обработки кремния: точечные (микровыколы, микроямки, холмики, периферийные сколы, поверхностные сколы) и линейные (трещины, царапины, бороздки);
- при термическом окислении: дефекты упаковки, колонии преципитатов быстродиффундирующих примесей, кластеры точечных дефектов;
- при диффузии возникают дефекты, инициируемые напряжениями внешними (дислокации и линии скольжения) и внутренними (сетки дислокаций несоответствия, дефекты упаковки, включения легирующего элемента); граничные дислокации, обусловленные скачком напряжений на границе раздела диффузионная область внедиффузионная область, и дефекты, связанные с исходным кремнием и проведением процесса диффузии [2].

В процессе производства гарантии надёжности и радиационной стойкости микросхем обеспечиваются: аттестацией каждой партии пластин на соответствие радиационной стойкости, контролем всех динамических параметров, измерением параметров как в нормальных условиях, так и на крайних значениях температур, проведением электротермотренировок (ЭТТ).

Надёжность ИС при эксплуатации характеризуется кривой зависимости интенсивности отказов от времени. Ранние отказы возникают вследствие конструктивных и технологических недостатков. Интенсивность отказов в период приработки имеет тенденцию к уменьшению по мере усовершенствования конструкции и технологии. Для прогнозирования надежности применяются ускоренные испытания. Проблема ускоренных испытаний изделий электронной техники приобретает все большее значение в связи с разработкой, производством и внедрением в эксплуатацию все большего количества аппаратуры с использованием микроэлектронной базы. Сложность современной аппаратуры и важность решаемых ею задач заставляют предъявлять к ее надежности высокие требования, Известно, чем сложнее аппаратура, тем труднее обеспечить ее надежную работу. Меры, которыми располагает при этом конструктор, бывают зачастую недостаточными из-за обстоятельств, вытекающих из условий эксплуатации аппаратуры, тогда единственным выходом из положения представляется применением высоконадежных элементов. Однако, прежде чем их применить, конструктор обязан заручиться гарантией того, что они действительно надежны в той степени, в какой это необходимо. В условиях современного массового производства, когда все многообразие факторов, влияющих на надежность выпускаемых изделий, не поддается всестороннему контролю, подобную гарантию могут дать только непосредственные испытания продукции на надежность. Между тем требования к надежности современных изделий, из которых комплектуется аппаратура, бывают зачастую настолько жесткими, что практически возможность убедиться в их выполнении до установки изделий в аппаратуру становится проблемой. Эти обстоятельства послужили причиной поиска способа получения информации о надежности выпускаемых производством изделий за особо короткие сроки и по возможности на меньшем количестве испытываемых образцов. Идея разработки методов ускоренных испытаний возникла в шестидесятых годах на основе наблюдений за поведением некоторых изделий в различных режимах. В этих опытах были обнаружены эмпирические закономерности, которые, казалось, могли быть использованы для ускоренных испытаний. По мере накопления опытных данных стали обнаруживаться необъяснимые несовпадения результатов экспериментов для одних и тех же элементов, которые, как оказалось впоследствии, легко объясняются различными условиями техно-

логии их изготовления (в первую очередь). Для объяснения результатов экспериментов необходимо было разработать критерий на основе теории, описывающей процессы износа изделий. Эта теория базировалась на прогнозировании с использованием теории вероятностей и математической статистики.

Основные направления ускоренных испытаний [1, 3–5]

Проведение испытаний изделий электронной техники необходимо для контроля их качества, для прогнозирования их надежности. С помощью ускоренных испытаний в нормальных условиях можно оценить надежность изделий электронной техники с некоторой достоверностью Ускоренные испытания дают возможность в более сжатые сроки (на порядок ила более) решить те же проблемы, что в настоящее время — время ускорения научно-технического прогресса — является очень важным моментом.

Проблема форсированных испытаний возникла в самом начале развития теории надежности, но до сих пор является весьма актуальной. Наиболее исследован случай нестабильного производства, когда распределение отказов изделий может меняться от партии к партии произвольным образом. Оказалось, что в этом случае точные методы форсированных испытаний (при неограниченном объеме выборки) возможны, как правило, лишь при наличии функциональной зависимости вида:

$$\xi = \varphi(\eta), \tag{1}$$

ξ и η – моменты отказов одного и того же изделия соответственно в нормальном (є) и форсированном (ε_δ) режимах. На основе (1) можно осуществить перерасчет результатов форсированных испытаний изделий на нормальные условия. Однако, это условие выполняется лишь для изделий, у которых можно ожидать существование одного доминирующего процесса старения. Так как при изготовлении микросхем таких факторов много, то распространено и пессимистическое мнение о необходимости проведения форсированных испытаний. Некоторые специалисты теории надежности считают, что с усложнением аппаратуры уменьшаются шансы на построение методов форсированных испытаний, обладающих приемлемым для практики точностью и достоверностью. Коэффициент корреляции между моментами отказов ξ и η в режимах (ε_{a}) и (ε_{b}) системы, состоящей из *п* последовательно соединенных элементов, стремится к единице при $n \to \infty$, Отсюда вытекает, что для сложных систем связь между ξ и η должна стремиться к линейной, то есть

$$\xi = K_{vck} \eta, \qquad (2)$$

где $K_{\text{уск}}$ – коэффициент ускорения.

Вывод о линейной зависимости (2) моментов отказов для систем с большим количеством элементов находит экспериментальное подтверждение. Так, было показано, что для ряда типов проводов пробивные напряжения при разных температурах линейно связаны между собой. Линейная зависимость (2) наблюдается также для интегральных микросхем и для ряда других изделий.

С развитием микроэлектроники надежность электронной аппаратуры значительно повышается. Процесс исследования надежности статистическими методами становится очень трудоемким, а иногда и невозможным. Для объяснения результатов форсированных испытаний следует привлекать физические методы.

Воздействие повышенных температур и напряжений на МОП ЗУ

Время наработки до отказа п-канальных МОП ЗУ обусловлено, в основном, отказами слоев окисла, внутрисхемных контактных узлов и металлизированных соединений. Физика отказов в слое окисла обусловлена развитием следующих механизмов: инжекцией носителей заряда в диэлектрик, повышенной напряженностью внутреннего электрического поля в дефектных местах, электрохимического разрушения диэлектрика и др. Если предположить, что все ловушки в диэлектрике в подзатворной области и в конденсаторе имеют одинаковую энергетическую глубину потенциальной ямы, не зависящую от приложенного напряжения, то в результате инжекции будут накапливаться захваченные ловушками носители, что может привести к возникновению микроканалов, которые создают благоприятные условия для термо- и электродиффузии. Наличие микроканалов в слое окисла повышает вероятность его пробоя.

Отказы внутрисхемных контактных узлов происходят вследствие образования интерметаллических соединений, время наработки до отказа зависит от применяемых материалов и структуры и оно обратно пропорционально температуре контактного узла. Механизм отказов металлизированных соединений связан с процессом электромиграции. Коррозия металлизации может привести к обрыву токоведушей дорожки вследствие гальванической или химической реакции, короткому замыканию в результате электролитического процесса,

массопереноса между соседними полосками металлизации и др.

Повышение температуры влечет за собой увеличение тока утечки через закрытые транзисторы, а повышение напряжения может привести к пробою закрытого МОПтранзистора (появлению канала между истоком и стоком в необратимом порядке). Увеличение температуры приводит к увеличению токов утечки закрытого транзистора и изменению порога срабатывания. Изменение температуры в пределах, допустимых для п-МОП- транзисторов, и напряжения, не превышающего пробивного, оказывает незначительное влияние на изменение характеристик схем обрамления, обусловленных утечками р-п-переходов в МОПтранзисторах этих схем. Все емкостные структуры микросхем потенциально находятся под угрозой пробоя из-за прорастания микроканалов при увеличении параметров внешнего воздействия. Это позволяет сделать вывод, что запоминающие элементы накопителя, подзатворные области всех МОП-транзисторов микросхемы должны быть чувствительны к воздействию повышенных температур и напряжения.

Выбор методики ускоренных испытаний БИС ЗУ, выбор и обоснование температурыиспытаний, ускоренные испытания некоторых типов микросхем рассмотрены в [6, 7, 8].

Прогнозирование надежности современных технических систем

При переходе на наноразмеры элементной базы меняются и многие методики расчетов. Возникают и проблемы помехоустойчивости, которые необходимо учитывать. В работе [9] приводятся данные по учету наноразмеров при расчете радиационной стойкости на КНИ-приборах. Разработана диффузионно-дрейфовая модель КНИ МОП транзисторов с частичным и полным обеднением, способная единым и непрерывным образом описывать в компактной аналитической форме вольтамперные характеристики транзистора во всех режимах его работы, может быть использована для моделирования токов утечки облученных приборов. Представлено обобщение модели на случай наноразмерных приборов с баллистическим переносом носителей в канале, а также на случай перспективных конфигураций с двойным затвором, обеспечивающих предельные характеристики приборов КМОП технологий.

Разработана комплексная модель радиационно-индуцированных токов утечки, обусловленных захваченным зарядом в толстых слоях краевой изоляции, позволяет

с высокой точностью проводить расчеты ВАХ облученных транзисторов КНИ и объемных технологий, а также дозовых зависимостей при разных условиях облучения. Продемонстрировано, что учет процессов радиационно-стимулированного отжига. связанного с процессом компенсации положительного заряда в окисле радиационно-индуцированными электронами из зоны проводимости SiO₂, является критически важным для адекватного моделирования. Расчетным образом показано, что краевой контакт между телом КНИ транзистора и землей может блокировать краевую утечку и существенно повысить радиационную стойкость ИС, что нашло подтверждение на эксперименте.

Радиационные испытания приборов и микросхем

Согласно действующим нормативным документам испытания проводятся на моделирующих установках (МУ), представляющих источники радиационных воздействий, имеющих единую или близкую физическую природу и характеристики с радиационными факторами, воздействующими в реальных условиях эксплуатации изделий.

К МУ относятся мощные импульсные установки тормозного рентгеновского излучения, ускорители протонов и электронов, ядерные реакторы и изотопные источники гамма-излучений. Однако обеспечить с помощью МУ требуемые информативность и достоверность испытаний функционально сложных изделий микроэлектроники достаточно трудно, а во многих случаях и невозможно, по ряду причин.

Прежде всего, это связано с необходимостью использования длинных (от 7 до 20 м) кабельных линий связи и высокими уровнями сопутствующих электромагнитных помех на МУ.

Во-вторых, для МУ характерна сравнительно высокая стоимость испытаний и низкая производительность.

В-третьих, существующие импульсные установки тормозного рентгеновского излучения не обеспечивают проведение испытаний по длительности импульса для длиннопериодной компоненты.

В-четвёртных, организационные сложности проведения испытаний на МУ (предварительные заявки, координационный план испытаний на год и др.) и удалённость экспериментально-испытательных баз от предприятий разработчиков и изготовителей ЭКБ практически не позволяют использовать МУ для оперативных оценок стойкости изделий на этапах разработки, производства и поставки].

В отдельных случаях при испытаниях используются имитирующие установки (ИУ) или имитаторы, т.е. источники воздействий различной физической природы, обеспечивающие адекватное проявление и моделирование в изделиях доминирующих эффектов, вызываемых воздействием радиационных факторов в реальных условиях эксплуатации изделий. В качестве таких установок используют: импульсные лазеры, источники на основе рентгеновских трубок, изотопные источники ядерных частиц, а также генераторы одиночных импульсных напряжения. Имитаторы моделируют, как правило, один из доминирующих механизмов воздействия на изделие различных факторов, вызывающих структурные повреждения, поверхностную или локальную ионизацию (и т.п.) и вызываемые ими первичные и вторичные радиационные эффекты (ионизационные токи, сбои, тиристорный эффект, пережоги металлизации и внутренних межсоединений, вторичный тепловой пробой, необратимые изменения параметров и др.).

Имитационные испытания следует проводить, когда отсутствуют соответствующие МУ, а также при отработке методик аттестационных испытаний в части выбора параметров-критериев стойкости, режимов и условий испытаний, при проверке применяемых технологических, конструктивно-топологических, схемотехнических и функциональных решений, направленных на снижение радиационной чувствительности изделий в процессе их разработки, при проведении периодических испытаний в условиях неритмичного производства изготовления изделий малыми партиями.

Особенности применения имитационных испытаний для оценки соответствия изделий требованиям стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений регламентируются стандартом ГОСТ, а методы и общие методики проведения имитационных испытаний изделий электронной техники и методы оценки их стойкости по результатам этих испытаний определены в ряде руководящих документов. Имитационные испытания позволяют исключить основные недостатки, характерные для испытаний на МУ, о которых говорилось выше. В частности, при работе имитаторов отсутствуют электромагнитные помехи, а длины кабельных линий, соединяющих устройства задания электрических и функциональных режимов и регистраторов с испытываемым изделием не превышают 1.5 м, что позволяет проводить испытания сложно функциональных ИС в динамических режимах (в реальном масштабе времени) с использованием средств на основе ПЭВМ.

Основным недостатком имитаторов, является необходимость удаления перед началом работы крышек корпусов изделий, если они изготовлены из «непрозрачных» для имитационных воздействий материалов. Кроме того, при лазерных имитационных испытаниях не воспроизводится ионизация диэлектрических структур изделий электронной техники, эффекты дозового усиления [10].

Выводы

- 1. Ускоренные форсированные испытания можно использовать для прогнозирования надежности микросхем и устройств на их основе.
- 2. Ускоренные форсированные испытания микросхем памяти позволяют утверждать, что при определенных условиях электротермотренировку можно использовать как метод отбраковки потенциально ненадежных микросхем.
- 3. Подбор температуры ускоренных испытаний и превышающих напряжений должен проводиться с учетом технологии изготовления, конструктивных особенностей и функционирования исследуемых микросхем.
- 4. Результаты расчетов критического заряда радиационно-индуцированной защелки при воздействии отдельных ионизирующих частиц позволяют выявить влияние различных технологических и схемотехнических факторов на параметры чувствительности ИМС. Показано, что учет эффекта просадки напряжения при им-

пульсном облучении позволяет объяснить экспериментальные особенности появления окон защелки при воздействии импульсного излучения при разных температурах.

Список литературы

- 1. Воротинский В.А., Дадерко Н.К. Ускоренные испытания полупроводниковых приборов и интегральных схем на надежность. Зарубежная радиоэлектроника. 1978. № 7. С. 50–65.
- 2. Горлов М.И., Емельянов В.А., А.В. Строгонов. Геронтология кремниевых интегральных схем. М.: Наука, $2004.-240~\rm c.$
- 3. Карташов Г.Д. Методы форсированных испытаний. В кн.: В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества продукции. М.: Знание, 1979.
- 4. Карташов Г.Д. Предварительные исследования в теории форсированных испытаний. В кн.: В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества продукции. М.: Знание, 1980. С. 62–106.
- 5. Карташов Г.Д. Форсированные испытания аппаратуры. Надежность и контроль качества. 1985. № 1. С. 18–24.
- 6. Попо Р.А., И.М. Рыбаков. Ускоренные испытания БИС ЗУ. Материалы моск. гор. НТК, 1982.
- 7. Попо Р.А., Рыбаков И.М., Смирнов Р.В. Методика увеличения надежности БИС путем воздействующих импульсов повышенного напряжения по шине питания. Материалы всес. конф. «Развитие теории и техники хранения информации». 1983. С. 82–85.
- 8. Попо Р.А., И.М. Рыбаков, Р.В. Смирнов. А.С. № 1403876. Способ и устройство повышения надежности микросхем полупроводниковой памяти с пережигаемыми микросхемами перемычками. 1987.
- 9. Зебрев Г.И. Моделирование работы и процессов деградации МОП транзисторов, обусловленных воздействием ионизирующего излучения // дисс. канд. техн. наук. М.: МИФИ, $2003.-126\ c.$
- 10. Анисимов А.В., В.Г. Герасимов, В.В. Гонтарь, В.А. Телец. Роль и место имитационных испытаний в системе обеспечения стойкости аппаратуры вооружения и военной техники к действию ионизирующих излучений [Электронный ресурс].