

2. Alexeev, V.F. Modeling of non-stationary heating of semiconductor structures under HEMP actions with short pulse duration / V.F. Alexeev and V.I. Zhuravliov // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P. 595–601.

## ВИДЫ ОТКАЗОВ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Бужинский А. Д.

Алексеев В. Ф. – канд. техн. наук, доцент

Ранние отказы активных элементов (АЭ), имеющие место в первые несколько сотен часов работы, вызваны, как правило, дефектами в окисле (проколами), вследствие которых образовались паразитные диффузионные области или короткое замыкание металлизации с кремнием, загрязнениями окисла, вызывающими повышенные токи утечки  $p$ - $n$ -переходов [1, 2].

Полупроводниковые ИС отличаются повышенной устойчивостью к ударным и вибрационным нагрузкам (безопасно выдерживают ускорения в 1000 g). Полупроводниковые активные элементы весьма чувствительны к перегрузкам по току и напряжению и выходят из строя даже при кратковременных перегрузках измеряемых миллисекундами. Кроме того, их надежность чрезвычайно зависит от температуры  $p$ - $n$ -перехода. В маломощных логических схемах, где разогрев кристалла незначителен, повышение температуры корпуса от 20 до 125°C увеличивает интенсивность отказов транзисторов в 18 раз, а при  $T=200^\circ\text{C}$  – в 50 раз.

Наиболее распространенной причиной отказов АЭ является выход из строя  $p$ - $n$ -перехода. Известны следующие виды отказов  $p$ - $n$  структур:

а) короткое замыкание (к.з.) в диодах и биполярных транзисторах: попадание проводящих частиц между контактными площадками или выводами;

б) пробой  $p$ - $n$ -переходов и проплавление металлизации через диффузионные слои в кремнии при высоких уровнях рассеиваемой мощности.

Короткие замыкания  $p$ - $n$ -переходов из-за нахождения между контактными площадками или выводами посторонних проводящих частиц, например металлических, встречаются редко. Эти частицы появляются вследствие отслаивания осажденного химическим путем металлического покрытия внутренней поверхности корпуса при резких ударах. При работе схемы в условиях вибрации металлические частицы могут попасть на кристалл и замкнуть один из  $p$ - $n$ -переходов.

Наибольшую опасность представляют различные виды пробоев  $p$ - $n$ -переходов, возникающие из-за перегрузок по току и напряжению.

Эти перегрузки обуславливаются неправильным использованием ИС в электронных устройствах и некорректной методикой измерения их параметров. При пробоях имеет место рассеивание больших мощностей, приводящее к нагреву кристалла вплоть до расплавления металлизации и проникновения металла через диффузионные слои в эмиттере и базе. В результате происходит к.з.  $p$ - $n$ -переходов эмиттер-база и база-коллектор. Асимметричные вольт-амперные характеристики  $p$ - $n$ -переходов вырождаются в прямые линии с наклонами, равными величинам малого сопротивления между замкнутыми электродами. Очевидно, что при этом диод или биполярный транзистор имеют катастрофический отказ.

Следует отметить, что пробой  $p$ - $n$ -переходов в кремниевых планарных диодах и транзисторах ИС не происходит одновременно по всей площади переходов.

Вторичный пробой проявляется в виде резкого уменьшения напряжения между выводами транзистора эмиттер-коллектор  $U_{кэ}$  с одновременным ростом коллекторного тока. Если транзистор находится достаточно долго (более 1мс) в состоянии вторичного пробоя, то происходит расплавление эмиттерной и базовой металлизации, проплавление сквозь базу и, следовательно, к.з. в цепях эмиттер-база, эмиттер-коллектор.

Анализ показывает, что вторичный пробой может иметь место при малых коллекторных токах и больших напряжениях  $U_{кэ}=U_{кэ0}$ , когда наблюдается заметная ударная ионизация в коллекторном  $p$ - $n$ -переходе, так и при сравнительно малых напряжениях  $U_{кэ}\ll U_{кэ0}$ , но при больших токах  $I_k$ .

В логических ИС транзисторы работают при очень малых уровнях мощности  $P < 10\text{мВт}$  и при малых  $U_k < 10\text{В}$ . Поэтому в таких схемах выход транзисторов из строя вследствие возникновения вторичного пробоя в нормальных рабочих условиях маловероятен. В микромощных логических схемах к.з. диодов и биполярных транзисторов происходит, как правило, вследствие туннельного пробоя эмиттерного и лавинного пробоя коллекторного  $p$ - $n$ -переходов при случайных значительных превышениях пробивных напряжений переходов  $U_{э60}$  и  $U_{к60}$ .

Исследования показали, что при подаче обратного напряжения длительностью даже несколько микросекунд, превышающего напряжение пробоя  $p$ - $n$ -перехода, в последнем выделяется значительная мощность и вследствие локального теплового удара происходит растрескивание кристалла кремния и окисла над ним. Это явление названо «*эффектом бильярдного шара*». После растрескивания сопротивление  $p$ - $n$ -перехода резко уменьшается, протекающие через деградированный переход токи резко увеличиваются. В результате локальный разогрев достигает температуры образования эвтектики  $Al-Si$  и алюминий проникает в слой кремния, вызывая к.з.  $p$ - $n$ -перехода.

Третий механизм возникновения к.з. *p-n*-переходов – электродиффузия кремния в алюминий. При обычных температурах ( $T < 200^\circ\text{C}$ ) кремний в алюминии почти не растворяется. Растворение кремния ограничивается скоростью тепловой диффузии кремния в алюминий, которая происходит очень медленно, с энергией активации 0,95 эВ.

Однако, если на алюминиевый контакт подать положительный относительно *Si* потенциал и пропустить токи большой плотности, то растворение *Si* в *Al* резко ускоряется вследствие электродиффузии. Алюминий вблизи поверхности кремния обедняется кремнием. Поэтому, несмотря на то, что растворимость *Si* в *Al* при рабочих температурах мала (0,003 вес % даже при  $255^\circ\text{C}$ ), все большее количество кремния из кристалла будет растворяться в алюминии. Этот процесс непрерывен, и в результате в кремнии образуются ямки, заполненные алюминием, который достигает ближайшего *p-n*-перехода и вызывает к.з.

Существуют и другие механизмы отказов активных элементов ИС.

Список использованных источников:

1. Алексеев, В.Ф. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Доклады БГУИР. – 2005. – № 3-4. – С. 65–72.
2. Алексеев, В.Ф. Определение температуры *p-n*-перехода вследствие импульсного нагрева и его программная реализация / В.Ф. Алексеев, В.И. Журавлёв // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. – 2005. – № 4. – С. 76–80.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В MATLAB

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Зинченко А. А.*

*Матюшков В. Е. – д-р. техн. наук, профессор*

Математическое моделирование приобретает все большую популярность среди специалистов технических специальностей. Это связано с тем, что в повседневной деятельности людям приходится принимать немало ответственных решений. Для того чтобы сравнить между собой различные стратегии проведения операции или принятия решения полезно иметь математическую модель исследуемой операции.

Аналитический подход предполагает использование математической модели реального объекта в форме алгебраических, дифференциальных, интегральных и других уравнений, связывающих выходные переменные с входными, дополненными системой ограничений. При имитационном моделировании используемая математическая модель воспроизводит алгоритм функционирования исследуемой системы во времени при различных сочетаниях значений параметров системы и внешней среды [1].

Средством математического моделирования являются такие пакеты, как Maple, MATLAB, Mathcad и другие. По сравнению с другими пакетами в области математического моделирования MATLAB позволяет наиболее полно использовать все современные достижения компьютерных технологий, в том числе средства визуализации и озвучивания данных [2].

Одной из надстроек пакета MATLAB является система Simulink. В качестве «кирпичиков» для построения модели используются модули, хранящиеся в библиотеке Simulink. Блоки могут быть связаны друг с другом как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и от логики работы модели. Любая модель может иметь иерархическую структуру, то есть состоять из моделей более низкого уровня, причем число уровней иерархии практически не ограничено. В ходе моделирования имеется возможность наблюдать за процессами, происходящими в системе. Для этого используются блоки-«смотровые окна», входящие в состав Simulink. Кроме того, состав библиотеки может быть пополнен пользователем за счет разработки собственных блоков [3].

Например, создадим модель колебаний маятника. Как известно, колебания математического маятника в виде груза с единичной массой, подвешенного на нерастяжимой нити длиной  $L$ , при малых углах отклонения от положения равновесия описываются дифференциальным уравнением вида:

$$\ddot{x} + k \dot{x} + f^2 x = F(t),$$

где  $x(t)$  – смещение груза от положения равновесия в функции времени  $t$ ,  $k$  – коэффициент затухания,  $f^2 = g/L$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $F(t)$  – внешнее силовое воздействие, отнесенное к единицам массы.

Подобным уравнением также можно описать колебания тока в электрическом контуре, при этом параметры уравнения будут определяться сопротивлением, емкостью и индуктивностью в контуре.

Блок-диаграмма модели, представлена на рисунке 1: