

**К ВОПРОСУ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ.  
ЯЧЕЙКА «ТЕПЛОВОЙ» ПАМЯТИ**

**О. В. ВОЛОДИНА, канд. экон. наук, доц. В. К. НИКОЛАЕВ,  
канд. физ.-мат. наук, доц. М. В. КОРЯЧКО,  
д-р физ.-мат. наук, проф. А. А. СКВОРЦОВ  
(Московский политехнический университет, Россия)**

*Представленная работа посвящена рассмотрению ячейки «тепловой» памяти, основанной на тепловом принципе сохранения информации. Описан принцип работы элемента «тепловой» памяти, основанный на сохранении бита информации в форме тепла. Из анализа принципа работы в составе динамической памяти компьютерных систем делается вывод о существенном уменьшении количества ошибок, возникающих в результате события флипбита. Рассмотрены причины появления флипбита, описаны механизмы его появления, отмечена частота возникновения флипбитов на кремниевых чипах памяти. Даны типы ошибок, к которым приводит событие флипбита, и возможные способы борьбы с его появлением. Проведен сравнительный анализ влияния излучения на традиционные элементы памяти и ячейку «тепловой» памяти.*

**Ключевые слова:** *радиационно-стимулированная деградация полупроводниковых приборов и структур, ионизирующие излучения, флипбит, ячейка памяти, сохранение данных.*

В настоящее время космическая радиация является ключевым фактором, влияющим на работоспособность полупроводниковых устройств космического применения [1]. Поэтому вопросы радиационно-стимулированной деградации полупроводниковых приборов в условиях воздействия ионизирующего излучения являются актуальными и на сегодняшний день. Это направление сохраняет свою актуальность и в связи с постоянной тенденцией минитюаризации изделий микро- и нанoeлектроники. Это приводит к существенному увеличению локальных тепловых нагрузок на кристаллы, что в сочетании с воздействиями ионизирующих излучений делают полупроводниковые структуры наиболее уязвимыми с точки зрения их деградации.

Очевидно, что работоспособность аппаратуры в условиях воздействия ионизирующих излучений в основном определяется надежной работой различных микроэлектронных компонентов, интегральных схем, но, главным образом, транзисторов.

При описании радиационных эффектов в структурах микроэлектроники рассматривают вначале дозовую деградацию. Механизмы дозовой деградации

носят характер постепенного старения («медленная» деградация). Она характеризуется постепенным изменением параметров полупроводниковых структур.

Наиболее чувствительными являются одиночные радиационные эффекты, связанные со случайным попаданием отдельных частиц в активные области элементов памяти, вызывая, в том числе переключение логического состояния.

Такого рода одиночные эффекты можно разделить на обратимые и необратимые. Обратимые переключения (сбои) происходят, как правило, в запоминающих устройствах статической и динамической памяти и представляют собой обратимое переключение ячейки из одного состояния в другое без потери работоспособности.

Наиболее неприятными являются одиночные события, приводящие к необратимым последствиям. Они связаны с радиационным выжиганием МОП транзисторов, а также пробой окислов и «мелких» p-n-переходов и т. д.

Остановимся на сбоях памяти, к которым относятся случайные события, проявляющиеся в виде ошибок чтения/записи ячеек памяти или в виде неконтролируемого изменения их состояния. В данной работе речь будет идти о дефектах памяти, возникающих в процессе эксплуатации под воздействием потоков высокоэнергетических частиц. Некоторые ошибки, вызванные сбоями в момент чтения/записи, могут быть исправлены с помощью повторных циклов чтения и/или записи. Однако, в данной работе мы остановимся на ошибках, связанных с физическим изменением состояния ячейки памяти и возможности разработки элементной базы более устойчивой к воздействию высокоэнергетических излучений. К примеру, существует даже специальный термин «флипбит». Это непредсказуемость изменения битов в компьютерной памяти из-за проникновения высокоэнергетических частиц в чувствительные области компьютерных микросхем [2], к которым, в частности, относится динамическая компьютерная память типа RAM. Флипбиты в микросхемах памяти приводят к ошибкам четырех типов [3]:

1. Незаметная ошибка, которая допускается системой;
2. Исправляемые ошибки, которые обнаруживаются и успешно исправляются;
3. Обнаруженные неисправимые ошибки;
4. Тихое повреждение данных, т. е. необнаруженная ошибка, которая повредила данные.

Самые опасные ошибки – это неисправимые или необнаруженные ошибки. Первые приводят к сбоям, а вторые – к потере данных [4]. Способом борьбы со случайными сбоями считается контроль ошибок. В теории информации контроль ошибок – это методы, позволяющие надежно передавать цифровые данные по надежным каналам. В частности, одним из таких методов является корректирующий код или помехоустойчивый код. Но далеко не вся динамическая память в компьютере поддерживает корректирующие коды, например: сетевые устройства, чипсеты материнских плат, кэши процессоров и т. д.

Таким образом, следует отметить, что наличие активных структур (биполярные р-п-переходы, МОП-транзисторы, КНИ – структуры и т. д.) в изделиях микроэлектроники не сможет исключить необратимой деградации при воздействии ионизирующих излучений. Одно из возможных решений данной проблемы может быть в изменении принципа обработки сигнала.

Примером такой структуры может служить предложенная нами ячейка «тепловой» памяти [5]. В ней реализуется сохранение информационного состояния бита памяти в форме тепла.

Для записи логической единицы в тепловую ячейку памяти ее необходимо нагреть. Для поддержания актуального информационного состояния логической «1» ячейку памяти постоянно подогревают. Для изменения сохраненных данных необходимо заблокировать подогрев ячейки. Когда температура ячейки памяти вернется к исходному значению, будет записан логический 0. На временной диаграмме работы тепловой ячейки памяти рис. 1 схематично изображена логика ее работы.

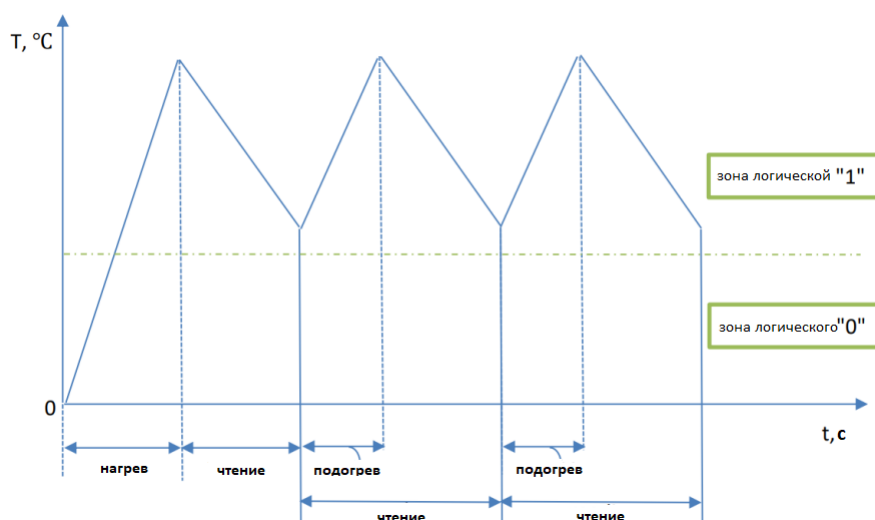


Рисунок 1. – Временная диаграмма работы тепловой ячейки памяти

Тепловая ячейка памяти разработана на системе металлизации [5], включающая тонкую пленку металла, нанесенную на поверхность полупроводниковой пластины, рис. 2.



Рисунок 2. – Система металлизации

Для пластины выбран полупроводниковый материал – кремний (Si), со следующими физическими параметрами: плотность –  $2330,0 \text{ кг/м}^3$ , изотропная теплопроводность –  $124,00 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , изотропное удельное сопротивление –  $10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Материалом для тонкой пленки металла был использован алюминий со следующими характеристиками: плотность –  $2713 \text{ кг/м}^3$ , изотропная теплопроводность –  $155,30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , изотропный секущий коэффициент теплового расширения –  $2,278 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$ .

Для работы тепловой ячейки памяти в соответствии с приведенной временной диаграммой, рис. 1, тонкую пленку металла, которая является запоминающим слоем, нагревают импульсами тока. Для нагрева и подогревания запоминающего слоя устанавливают ток с амплитудой импульсов –  $2,5 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$ , длительностью импульсов нагрева и подогрева – 1 мс, количеством импульсов нагрева – 5 шт., количеством импульсов подогрева – 2 шт.

Запись логической «1» на запоминающий слой происходит в результате его нагрева, измерении температуры запоминающего слоя после снижения скорости его остывания и расчете температуры логического «0», которая на  $273,45 \text{ К}$  ниже температуры остывания. Процесс подогревания необходим для поддержания актуального информационного состояния ячейки памяти в зоне логической «1». Такой процесс называется регенерацией сохраненного информационного состояния ячейки памяти. Регенерация происходит с частотой  $0,2 \text{ Гц}$ .

Температура логического «0» необходима для считывания информационного состояния с тепловой ячейки памяти, путем сравнения её с текущей температурой запоминающего слоя. Сравнение выполняет программное обеспечение для устройства управления функционированием тонкопленочной ячейки памяти.

Запись логического «0» на запоминающий слой осуществляется путем прекращения подачи импульсов тока через пленку алюминия, в результате чего температура запоминающего слоя опускается ниже установленной температуры логического «0».

Во избежании перегрева алюминиевой пленки в результате подряд многократно записанных логических «1», т. е. при нагреве запоминающего слоя с температурой выше температуры логического «0», применяется программа корректировки частоты импульсов подогрева. Программа корректировки уменьшает частоту импульсов подогрева, когда температура запоминающего слоя на несколько десятых долей выше температуры логической «1», определенной как температура логического «0» увеличенная на  $273,95 \text{ К}$ .

График изменения температуры запоминающего слоя с записанной на него логической «1» в течение 7,5 минут работы тепловой ячейки памяти по приведенному алгоритму приведен на рис. 3. График сформирован программным обеспечением для устройства управления функционированием тонкопленочной ячейки памяти.

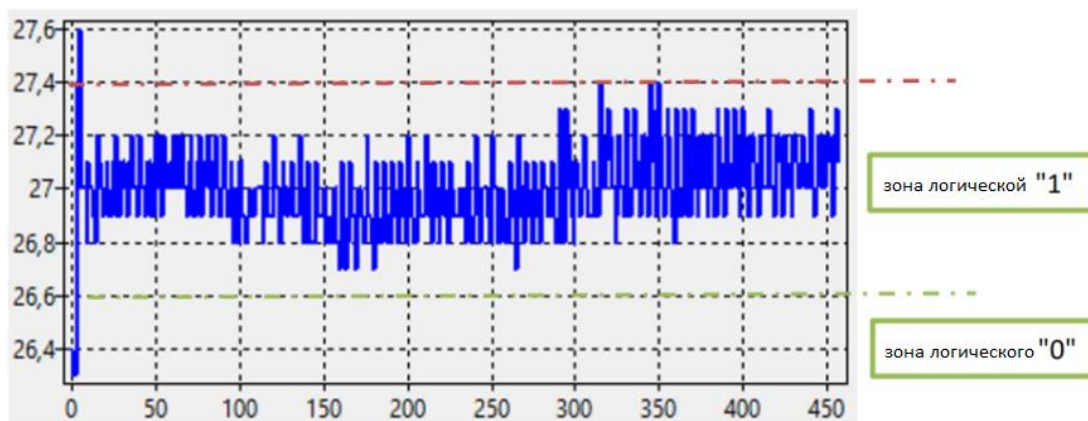


Рисунок 3. – График изменения температуры запоминающего слоя

Принцип сохранения информационного состояния в форме тепла, используемый в тепловой ячейке памяти, изменяет логику события флипбита. Флипбит в тепловой ячейке памяти должен привести к нагреву холодной ячейки или, наоборот, остыванию теплой. Таким образом, принцип сохранения информации базируется на системе металл-полупроводниковая подложка и наличие высокоэнергетических излучений (и соответственно появление радиационных дефектов как в алюминии, так и в кремнии) не способны принципиально изменить логику работы ячейки.

**Заключение.** В работе проведен краткий обзор радиационно-стимулированной деградации полупроводниковых структур (биполярные p-n-переходы, МОП и КНИ структуры и т. д.). Перечислены ключевые механизмы необратимой деградации полупроводниковых структур, в условиях воздействия ионизирующих излучений. Представлена ячейка «тепловой» памяти, позволяющая минимизировать (по сравнению с традиционными ячейками памяти) воздействие ионизирующих излучений. Показано, что хранение информационного состояния бита информации в форме тепла ограничивает влияние высокоэнергетических космических частиц на микросхемы памяти.

**Финансовая поддержка.** Работа выполнена за счет гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых ученых (проект МК-1156.2021.4), а также гранта РФФИ №№22-29-01373.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акишин, А. И. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов / А. И. Акишин, Л. С. Новиков // М. : Знание. – 1983. – 64 с., ил. – (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия», № 4).
2. May, T. C. A New Physical Mechanism for Soft Errors in Dynamic Memories / T. C. May, M. H. Woods // 16<sup>th</sup> International Reliability Physics Symposium. – 1978. – P. 33-40. – DOI: 10.1109/IRPS.1978.362815.
3. Ziegler, J. F. Accelerated testing for cosmic soft-error rate / J. F. Ziegler, H. P. Muhlfeld, C. J. Montrose, H. W. Curtis, T. J. O’Gorman and J. M. Ross // IBM Journal of Research and Development. – Jan. 1996. – Vol. 40, no. 1. – P. 51–72. – DOI: 10.1147/rd.401.0051.

4. Wang, F. Soft error considerations for computer web servers / F. Wang, V. D. Agrawal // 42<sup>nd</sup> South-eastern Symposium on System Theory (SSST). – 2010. – P. 269–274. – DOI: 10.1109/SSST.2010.5442820.
5. Володина, О. В. Температурные режимы функционирования «Тепловой ячейки» / О. В. Володина, А. А. Скворцов, Д. Е. Пшонкин // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2022. – Т. 86. – № 11. – С. 1536-1540. – DOI: 10.31857/S0367676522110333. – EDN VQLHTQ.