

УДК 621.382

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ПИТАНИЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ

В.И. ПЛЕБАНОВИЧ*, С.М. БОРОВИКОВ, Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ, И.А. БУРАК

**Научно-производственное объединение «Планар»,
Партизанский пр-т, 2, 220023, Минск, Беларусь*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 30 мая 2016

Для кристаллов интегральных микросхем (ИМС) энергонезависимой памяти предлагается способ прогнозирования времени хранения информации после отключения питания. Прогнозирование выполняется с использованием ускоренных испытаний, в качестве которых рассматриваются температурные воздействия, сопровождающие технологические операции помещения кристалла в корпус и сборки ИМС. Для комплекса воздействий с учетом всех технологических операций сборки ИМС выполнена оценка коэффициента ускорения испытаний и для нормальных условий эксплуатации кристалла ИМС найдено гарантированное время хранения информации после отключения питания.

Ключевые слова: интегральные микросхемы, энергонезависимая память, время хранения информации, отключение питания.

Введение

Электрически стираемые перепрограммируемые постоянные запоминающие устройства (в англоязычной редакции EEPROM – Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) для запоминания данных используют эффект хранения заряда на плавающем затворе МОП-транзистора при отключенном питании. Одной из важнейших эксплуатационно-технических характеристик является продолжительность хранения информации после отключения питания. Для первых ИМС энергонезависимой памяти серии 1568, разработанных в 90-х годах прошлого века, согласно техническим условиям, время хранения информации при отключенном питании гарантировалось не менее 10 лет [1], но уже для следующего поколения запоминающих устройств (ИМС типа IN24LC...) технической документацией гарантируется время хранения информации не менее 200 лет [2].

Актуальным является вопрос о подтверждении гарантированного в ТУ времени хранения информации после отключения питания. Для ответа на этот вопрос нужны соответствующие испытания готовых (корпусированных) ИМС. Провести испытания в нормальных условиях невозможно. В серийном производстве, по мнению некоторых специалистов, также проблематична ускоренная проверка с использованием максимальных рабочих температур (плюс 125 °С), т.к. для этого понадобится дополнительно 500 часов рабочего времени и значительные затраты электроэнергии и, как следствие, увеличится себестоимость изготовленных ИМС. Отказываться от контроля вообще нежелательно, так как тогда проблемы, которые возникнут у потребителя, могут обернуться заводам-изготовителям ИМС рекламациями и денежными штрафами. Определенный выход может быть найден, если различного вида воздействия, сопровождающие технологический процесс сборки ИМС, рассматривать в качестве факторов, ускоряющих испытания.

Теоретический анализ

Процесс производства ИМС сложный и длительный. Его условно можно разбить на следующие этапы:

- получение бескорпусных микросхем – кристаллов на полупроводниковой пластине групповым (интегральным) методом по планарной технологии;
- тестирование кристаллов на пластине;
- разделение полупроводниковой пластины на отдельные кристаллы;
- операции, обеспечивающие помещение годных кристаллов в корпуса;
- тестирование и испытание готовых (корпусированных) ИМС.

Технологический процесс – это последовательность технологических операций, которые определены маршрутом изготовления изделия. Технологические операции в процессе выполнения оказывают различные воздействия на изготавливаемое изделие. В процессе сборки ИМС кристалл подвергается воздействию повышенной температуры (в процессе сушки клея, присоединения выводов, герметизации пластмассой), механическим напряжениям (при разделении пластины на кристаллы, герметизации пластмассой). Но чаще всего воздействие на кристалл ИМС оказывается комплексным. Так например, во время присоединения выводов кристалл подвергается воздействию температуры, механического давления и ультразвука. При выполнении герметизации имеют место воздействия на кристалл механических усилий и повышенной температуры, характеризующиеся своей энергией воздействия на кристалл, что оставляет определенный «след» на характеристиках изготовленной ИМС. При значительных воздействиях могут возникнуть условия, приводящие к браку кристаллов ИМС.

В процессе разработки производственного процесса изготовления ИМС технологи стремятся минимизировать влияние на надежность и качество кристалла побочных эффектов, обусловленных технологическими воздействиями. Но из побочных воздействий на кристалл можно извлечь некоторую пользу.

Для класса ИМС EEPROM, использующих эффект хранения заряда на плавающем затворе МОП-транзистора при отключенном питании, начиная со стадии контроля функционирования ИМС на пластине (контроля кристалла) создаются предпосылки ускоренных испытаний на длительность хранения информации кристаллом ИМС после отключения питания. В качестве ускоряющих факторов могут рассматриваться воздействия, сопровождающие дальнейшие технологические операции: помещение кристалла в корпус и сборка ИМС. Процедура ускоренных испытаний в этом случае должна включать следующие действия. После того, как изготовление и тестирование кристалла на пластине прошли успешно, в ячейки памяти годных кристаллов нужно записать информацию (на затворы МОП-транзисторов инжектировать заряд). Далее продолжить изготовление ИМС, выполнять все технологические операции по размещению кристалла в корпусе и сборке ИМС. Затем, перед первым тестированием корпусированной ИМС, прочитать записанную информацию и сравнить ее с эталоном. До начала сборочных операций в ячейки памяти годных кристаллов инжектировался заряд, который должен сохраниться в процессе проведения сборочных операций. Те ячейки (кристаллы), которые сохранили инжектированный заряд, признаются прошедшими тест на время хранения информации. Таким образом, указанная процедура позволяет совместить выполнение операций сборки ИМС EEPROM с проведением ускоренных испытаний и прогнозированием длительности хранения записанной информации кристаллом ИМС после отключения питания. Так как в указанных испытаниях в качестве ускоряющих факторов рассматриваются воздействия, сопровождающие технологические операции сборки ИМС, то при анализе результатов этих испытаний необходимо для каждой операции уточнить уровни воздействия на кристалл, определить коэффициент ускорения испытаний, с учетом времени выполнения операций рассчитать время испытаний, соответствующее нормальным условиям, и далее получить прогнозное время хранения информации.

Ускоренные и отбраковочные испытания ИМС

Отраслевой руководящий документ РД 11 0755-90 «Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность» [3] устанавливает методы

ускоренных испытаний на безотказность, долговечность, гамма-процентный ресурс и описывает ускоренные испытания путем форсирования режимов работы ИМС: увеличения температуры, тока, напряжения, а также комбинированное действие этих факторов. Для каждого фактора в [3] приводится модель влияния фактора на ускорение испытаний и формула расчета коэффициента ускорения (табл. 1). Цель РД 11 0755-90 упорядочить проведение ускоренных испытаний готовых ИМС, поэтому ускоряющие факторы выбраны с учетом удобства воздействия на готовые ИМС или тестовые структуры.

Таблица 1. Модели расчета коэффициентов ускорения для различных ускоряющих факторов

Ускоряющий фактор	Модель	Формула (модель) расчета коэффициента ускорения и пояснение параметров	Значения констант
Температура T	Экспоненциальная	$K = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_y} \right) \right],$ <p>где E_a – энергия активации механизма отказа; k – постоянная Больцмана; T_0, T_y – температура кристалла в нормальном и форсированном режимах.</p>	$E_a = 0,3 \dots 1,2$ эВ $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К
Плотность тока J	Степенная	$K = \left(\frac{J_y}{J_0} \right)^n,$ <p>где J_0, J_y – плотность тока в нормальном и форсированном режимах; n – константа модели.</p>	$n = 1 \dots 2$
Напряжение U	Экспоненциальная	$K = \exp \left[\sigma \left(\frac{U_y - U_0}{U_{\text{проб}}} \right) \right];$ $K = \exp \left[\beta (U_y - U_0) \right],$ <p>где σ, β – константы моделей; U_0, U_y – напряжение в нормальном и форсированном режимах; $U_{\text{проб}}$ – пробивное напряжение, указанное в технической документации.</p>	$\sigma = 5 \dots 10$ $\beta = 0,02 \dots 0,05$ В ⁻¹

Форсирование током (обычно пользуются плотностью тока), используют в тех случаях, когда необходимо испытать на надежность проводники и контакты. Напряжение выбирают в случаях, когда необходимо оценить электрическую прочность, зарядовую стабильность слоя диэлектрика или границы раздела диэлектрик-кремний. Температура применяется для ускорения физико-химических процессов, происходящих в ИМС, и в определенном смысле носит универсальный характер. Температура ускоряет рост дефектов в объеме кристалла, деградацию параметров, увеличивает токи утечки. Для повышения коэффициента ускорения температура может быть использована в комбинациях с напряжением и/или током.

Испытания ИМС проводятся в процессе производства для повышения их надежности за счет отбраковки потенциально ненадежных экземпляров, а также для оперативного контроля качества технологического процесса изготовления ИМС. С некоторыми подходами к отбраковке потенциально ненадежных изделий электронной техники можно ознакомиться в [4]. Факторы (воздействия), используемые для отбраковочных испытаний, и выявляемые ими дефекты (механизмы отказов) при производстве ИМС указаны в табл. 2 [5].

Отказы ИМС условно можно разделить на две группы. В первую группу следует отнести отказы, связанные с кристаллом, во вторую – отказы, обусловленные системой выводов и корпусом ИМС. Из табл. 2 видно, что отказы, присущие кристаллу, выявляются испытаниями с использованием температуры и с помощью электрических нагрузок, а отказы, присущие системе выводов и корпусу (операциям сборки ИМС в корпусе), – механическими испытаниями и испытаниями на герметичность в условиях повышенной влажности.

Таблица 2. **Отбраковочные испытания ИМС и механизмы отказов**

Фактор или испытание, используемое для выявления дефекта	Механизмы отказов, обусловленные							
	дефектами в кристалле кремния	дефектами металлизации кристалла	электрической нестабильностью	загрязнением поверхности	дефектами монтажа кристалла	дефектами в сварных соединениях	дефектами герметизации	дефектом корпуса
Повышенная температура	+	+		+				
Электрические испытания	+	+	+	+				
Термоэлектро тренировка	+	+	+	+				
Термоциклы						+		
Вибрация					+	+		
Одиночные удары					+	+		
Многократные удары					+	+		
Линейное ускорение					+	+		
Испытания на герметичность							+	+
Повышенная влажность							+	

В ячейках табл. 2 знаком «+» отмечены дефекты, выявляемые с помощью воздействующего фактора или вида испытаний.

Повышенная температура является воздействием, необходимым для проведения некоторых операций технологического процесса сборки ИМС, и в то же время – универсальным ускоряющим фактором при проведении испытаний. На ускорение процессов, приводящих к отказу ИМС, оказывают влияние и другие воздействия. Например, механическое давление, ультразвук, ультрафиолетовые лучи, механическая резка кремния при разделении пластин и их утонении способны при определенных условиях ускорить процессы деградации, происходящие в кристалле. Но для определения коэффициента ускорения за счет этих факторов необходимы дополнительные целенаправленные и, как правило, экономически дорогостоящие исследования.

Операции технологического процесса сборки как разновидность ускоренных испытаний кристалла ИМС

Для расчета коэффициента ускорения при температурных воздействиях, сопровождающих технологические операции процесса сборки ИМС, необходимо знать значение температуры и время ее воздействия на каждой операции.

Технологический процесс после завершения операции «Функциональный контроль на пластине» до операции «Измерение электропараметров в нормальных условиях» включает десятки промежуточных операций. Для этих операций необходимо рассчитать коэффициент ускорения испытаний. Для его определения построена температурно-временная диаграмма технологического маршрута сборки ИМС (рис. 1), на которой указаны температура $T_{оп}$ (°C) и время выполнения $t_{оп}$ (мин) каждой операции. Диаграмма учитывает только технологическое время, необходимое на выполнение операций, и не учитывает время, обусловленное межоперационными простоями, и время, затрачиваемое на перенос изделия с одного рабочего места на другое.

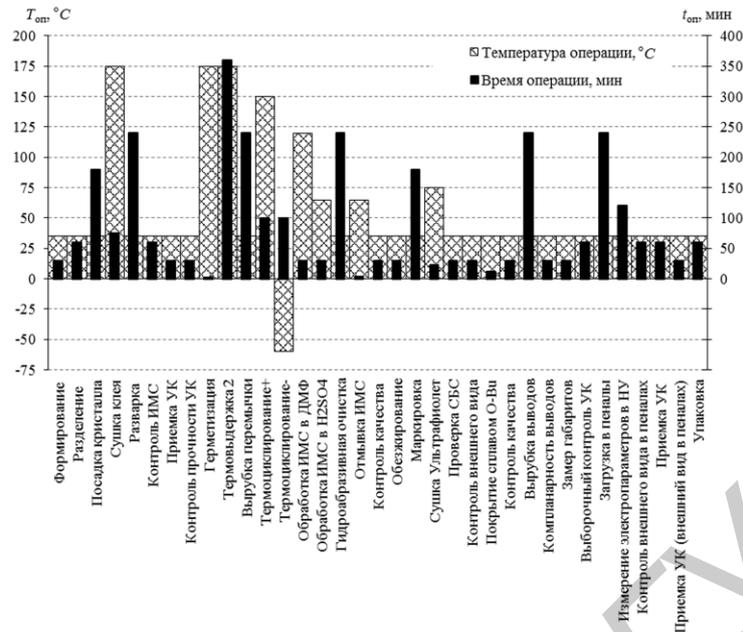


Рис. 1. Температурно-временная диаграмма сборки ИМС

При выполнении технологических операций по сборке ИМС процессы, приводящие к отказам, ускоряются при повышении температуры по экспоненциальному закону. Коэффициент ускорения испытаний за счет повышенной температуры, необходимой для выполнения технологической операции, может быть подсчитан по формуле

$$K = \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_n + 273} - \frac{1}{T_{оп} + 273} \right) \right], \quad (1)$$

где E_a – энергия активации процесса, ответственного за возникновение отказа; k – постоянная Больцмана ($k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К; К – градус Кельвина); T_n – температура (°C) в нормальных условиях; $T_{оп}$ – температура (°C) выполнения технологической операции.

Рассчитанные по формуле (1) коэффициенты ускорения K для всех операций процесса сборки ИМС можно представить в виде карты испытаний, обусловленных технологическим процессом сборки. Эта карта позволит определить наиболее критические операции с точки зрения надежности ИМС. Сам по себе коэффициент ускорения K показывает только то, как ускоряется процесс, приводящий к отказу. Вторым важным параметром испытаний является продолжительность воздействия на кристалл, определяемая в данном случае временем $t_{оп}$ температурного воздействия при выполнении технологической операции.

Зная коэффициент ускорения K_i для каждой i -й технологической операции, можно подсчитать эквивалентное время испытаний $t_{экв.i}$, соответствующее нормальным условиям:

$$t_{экв.i} = t_{оп.i} K_i, \quad (2)$$

где $t_{оп.i}$ – время температурного воздействия на кристалл при выполнении i -й технологической операции; K_i – коэффициент ускорения, рассчитанный по формуле (1) для i -й технологической операции.

Используя данные, приведенные на рис. 1, по формуле (1) для каждой i -й технологической операции рассчитан коэффициент ускорения испытаний за счет температурного воздействия на кристалл. Энергия активации E_a в соответствии с рекомендациями руководящего документа [3] была принята $E_a = 1$ эВ. С учетом времени температурного воздействия на кристалл $t_{оп.i}$ при выполнении i -й технологической операции для каждой из них по выражению (2) определено значение времени испытаний $t_{экв.i}$, соответствующее нормальным условиям. Эти расчеты выполнены в НПО «Планар», их результаты представлены в виде столбиковой диаграммы (рис. 2), на которой по

горизонтальной оси указаны операции технологического процесса сборки ИМС, по левой вертикальной оси – значения коэффициентов ускорения K_i за счет наличия температурного воздействия при выполнении данной (i -й) операции, а по правой оси – время испытаний $t_{экв,i}$, пересчитанное для i -й операции к нормальным условиям.

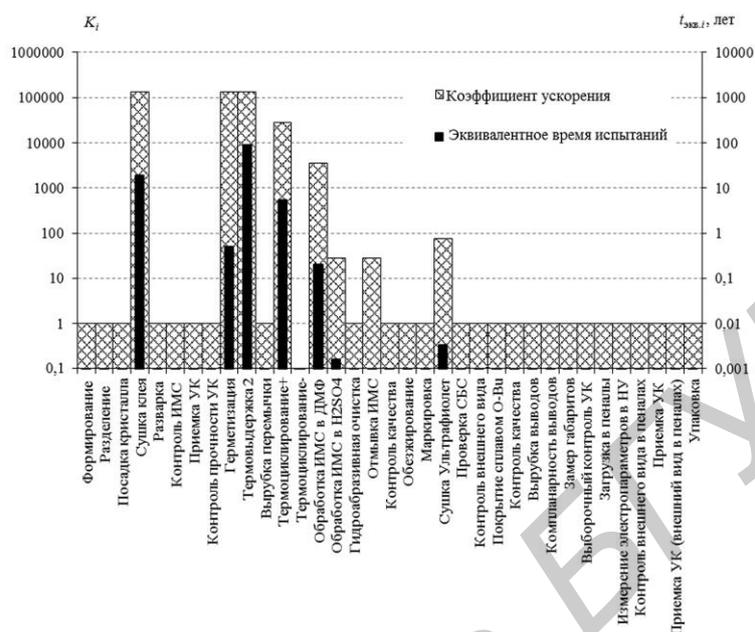


Рис. 2. Коэффициенты ускорения и соответствующее нормальным условиям время испытаний для операций технологического процесса сборки ИМС

Суммарное время испытаний t_{Σ} , соответствующее нормальным условиям с учетом всех операций технологического процесса сборки ИМС, найдено как

$$t_{\Sigma} = \sum_i t_{экв,i} \quad (3)$$

где суммирование выполняется по тем операциям технологического процесса сборки ИМС, при выполнении которых имеют место температурные воздействия на кристалл: температура выполнения операции более 35°C . По выражению (3) получено $t_{\Sigma} = 116,5$ лет.

Отметим, если время выполнения операции «Термовыдержка 2» увеличить с 6 до 20 ч, то с использованием выражений (2) и (3) будет получено $t_{\Sigma} \approx 320$ лет.

Можно утверждать, что ячейки памяти (кристаллы ИМС), которые сохраняют заряд после завершения сборочных операций ИМС (при условии выполнения операции «Термовыдержка 2» в течение 20 ч), подтвердили бы в нормальных условиях время хранения информации при отключении питания не менее 320 лет. Доля ячеек памяти, сохранивших заряд, определит вероятность, с которой гарантируется время хранения информации не менее 320 лет для кристалла ИМС и не менее 200 лет – для готовых (корпусированных) ИМС.

Заключение

Выполнение технологических операций по размещению кристалла в корпус и дальнейшей сборке ИМС энергонезависимой памяти может рассматриваться как проведение ускоренных высокотемпературных испытаний. По результатам этих испытаний представляется возможным спрогнозировать для кристалла ИМС срок хранения записанной информации, и при проведении контрольных испытаний наметить пути подтверждения нормативного (согласно технической документации) времени хранения информации после отключения питания для готовых (корпусированных) ИМС.

PREDICTION OF INFORMATION STORAGE TIME AFTER POWER OFF FOR INTEGRATED CIRCUITS OF EEPROM

V.I. PLEBANOVICH, S.M. BOROVIKOV, E.N. SHNEIDEROV, I.A. BURAK

Abstract

For crystals of EEPROM integrated circuits (ICs) a method for predicting of information storage time after the power is turned off is provided. Prediction is performed using the accelerated tests, which are considered as the temperature effects that accompany the technological operations in the premises of the crystal body and the ICs assembly. All technological IC assembly operations have complex effect. For this effect, estimated coefficient of acceleration tests is founded. Also for normal operating conditions of the ICs it's found the guaranteed time of information storage after power off.

Keywords: integrated circuits, EEPROM, information storage time, power is turned off.

Список литературы

1. Технические условия АДБК.431200.197 ТУ. Микросхемы интегральные серии ЭКР1568, К1568, ЭКФ1568, ИЛ9005N, INA84C122D, INA84C641NS-168, INA84C641NS-268, INA84C641NS-368, INA84C641NS-468, INF8594EN, INA8583N, INF8582EN-2, INF85116-3N.
2. Технические условия РБ 10024905.061-2003 Микросхемы интегральные IN24LC04BN, IN24LC04BD.
3. Отраслевой руководящий документ РД 11 0755-90. Микросхемы интегральные. Методы ускоренных испытаний на безотказность и долговечность.
4. *Боровиков С.М.* Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники. М., 2013.
5. *Горлов М.И.* Физические основы надежности интегральных микросхем. Воронеж, 1992.