

Расчетно-экспериментальная оценка срока активного существования микроэлектронных устройств космического назначения

В. П. Безмен, к. т. н., contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Жуков, д. т. н., доцент, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. М. Ильин, contact@spacecorp.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Степанов, к. х. н., info@kompozit-mv.ru

АО «Композит», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

А. И. Вялов, info@kompozit-mv.ru

АО «Композит», г. Королев, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлена расчетно-экспериментальная оценка срока активного существования (САС) микроэлектронных устройств (МЭУ) космического назначения. Одним из конструктивных элементов, определяющим САС МЭУ, является адгезив, с помощью которого производится крепление МЭУ на основание корпуса. В расчетах сделано допущение, что деградация адгезива при повышенной температуре описывается уравнением Аррениуса. Изготовлены три партии макетных образцов МЭУ с тестовыми структурами, в которых монтаж кристалла тестовой структуры осуществлялся с помощью адгезивов марки ОТПК-П и ВК-26М в качестве образца сравнения. Проведение ускоренных испытаний тестовых структур показало, что применение адгезивов марки ОТПК для монтажа МЭУ может обеспечить САС 15 лет.

Ключевые слова: адгезив, деградация, микроэлектронное устройство, срок активного существования, температура

Calculated Experimental Evaluation of the Active Life of Microelectronic Devices for Space Purposes

V. P. Bezmen, Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zhukov, Dr. Sci. (Engineering), associate professor, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. M. Ilyin, contact@spacecorp.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Stepanov, Cand. Sci. (Chemistry), info@kompozit-mv.ru

Joint Stock Company "Kompozit", Korolyov, Russian Federation

A. I. Vyalov, info@kompozit-mv.ru

Joint Stock Company "Kompozit", Korolyov, Russian Federation

Abstract. The article presents a calculation-experimental estimate of the active lifetime (ALT) of microelectronic devices (MED) for space purposes. One of the structural elements that determines the ALT of the MED is an adhesive, which is used to mount the MED on the base of the main body. In the calculations, it is assumed that the degradation of the adhesive at elevated temperature is described by the Arrhenius equation. Three batches of prototypes of the MED with test structures were made, in which the mounting of the crystal of the test structure was carried out using the OTPK-P and VK-26M adhesives as a reference sample. Accelerated testing of test structures showed that the use of OTPK brand adhesives for mounting MEA could provide ALT of 15 years.

Keywords: adhesive, degradation, microelectronic device, lifetime, temperature

Введение

Известно, что космический аппарат — это сложная техническая система, которая, находясь в космосе, должна выполнять возложенные на нее функции в условиях с дестабилизирующими факторами космического пространства: глубоким вакуумом, большим перепадом температур, радиацией, потоками заряженных частиц и т. д. [1, 2]. Поэтому бортовая аппаратура (БА) космического аппарата (КА) должна иметь наработку на отказ не менее 130 тыс. ч (15 лет) и сохраняемость не менее 25 лет [3]. Одним из возможных путей оценки срока активного существования аппаратуры является проведение ускоренных испытаний приборов, составляющих ее, и, в частности, микроэлектронных устройств (МЭУ). В этой связи расчетно-экспериментальная оценка срока активного существования микроэлектронных устройств космического назначения является крайне актуальной задачей.

Цель работы — разработка оценки срока активного существования микроэлектронных устройств, входящих в состав БА КА.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбрать элемент конструкции МЭУ, который определяет срок его активного существования. Согласно [4], в ряде случаев этим элементом является конструкционный материал — адгезив (клей), используемый в МЭУ для крепления кристалла к основанию либо металлокерамического корпуса, либо подложки. В процессе эксплуатации МЭУ из объема адгезива могут выделяться химически активные соединения (например, вода, галогены и др.), приводящие к выходу его из строя, из-за коррозии алюминиевой металлизации. Кроме того, как любой полимерный материал адгезив подвержен неконтролируемому естественному старению;

- выбрать метод испытания, с помощью которого возможно получение данных по срокам активного существования МЭУ.

Как правило, ускорение продолжительных испытаний достигается за счет увеличения температуры по сравнению с ее значением при нормальной эксплуатации. При этом принимается допущение, что как при повышенной температуре, так и при нормальных условиях ускоряются

одни и те же деградационные процессы, приводящие к отказу прибора. Скорость протекания деградационных процессов и отказов полупроводниковых приборов, в том числе и МЭУ, при повышенной температуре подчиняется уравнению Аррениуса [5, 6], что позволяет линейно экстраполировать результаты испытаний с области повышенных температур на нормальные условия эксплуатации МЭУ.

Для функционирования МЭУ адгезив должен обладать удельным объемным электрическим сопротивлением не хуже 10^{14} Ом·см и прочностью сцепления при отрыве не менее 2,0 МПа в интервале рабочих температур [7]. Деградационные процессы в адгезионном соединении МЭУ протекают как при его функционировании, так и без подачи напряжения, и проявляются в потере либо адгезионных, либо изоляционных свойств, либо их обоих. Как правило, проявление потери адгезионных свойств в полимерных покрытиях обусловлено разрывом химических связей в органическом материале и адгезионных связей с подложкой и кристаллом прибора [8]. Появление токов утечек через клеевой шов — это результат разрыва связей в полимерной матрице материала с образованием нескомпенсированных валентностей.

Для монтажа кристалла МЭУ на основание металлокерамического корпуса используется фенолачучуковый однокомпонентный адгезив ВК-26М. Он полностью смачивает склеиваемые поверхности кристалла МЭУ и керамического основания корпуса, обеспечивая формирование соединений с минимальной толщиной клеевого шва. Малая толщина клеевого шва позволяет избежать разрушения клеевых соединений из-за внутренних напряжений в клеевом шве, обусловленных разными коэффициентами линейного теплового расширения (КЛТР) склеиваемых материалов и адгезива. По данным авторов [9], после его отверждения при температуре 523 К в течение не менее 3 ч, он практически не выделяет продуктов, способных к конденсации, обеспечивая минимальное содержание паров воды (до 0,5 % об. ч.) в подкорпусном пространстве прибора с адгезионным соединением.

Известно, что не все элементы МЭУ выдерживают воздействие температуры 503–523 К при отверждении адгезива. Появились данные об однокомпонентном, теплопроводном, с низким

газовыделением эпоксидном адгезиве марки ОТПК-П, разработанном в АО «Композит», обладающем высокими электроизоляционными характеристиками и имеющем режимы отверждения: 1 ч при 393 К и 2 ч при 423 К [10].

Для проведения ускоренных испытаний была разработана тестовая структура, представляющая из себя кристалл из кремния КДБ-7,5 (100) размером $5,1 \times 5,1$ мм, покрытый термическим окислом толщиной 0,5–0,6 мкм, на котором сформированы полоски из алюминия различной ширины: 8, 16 и 24 мкм. Толщина металлизации 1 мкм. Размер контактных площадок у полосок 120×100 мкм. К ним методом ультразвуковой сварки (УЗС) приваривались выводы из алюминиевой проволоки диаметром 30 мкм. На рис. 1 представлен вид кремниевой пластины диаметром 76 мм с тестовыми структурами. Общее количество тестовых структур на пластине составило 88 штук.

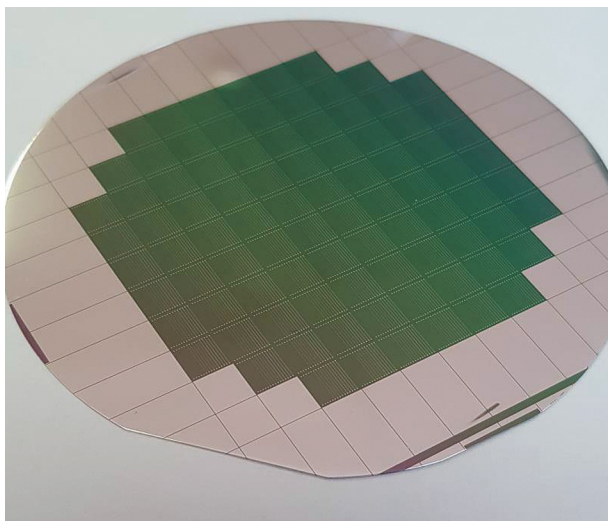


Рис. 1. Внешний вид кремниевой пластины с тестовыми структурами

Для испытаний было изготовлено двенадцать образцов, которые представляют собой кристаллы тестовой структуры, монтаж которых на керамическое основание корпуса Н14.42-1В осуществлялся с помощью ВК-26М и двух модифицированных адгезивов марки ОТПК-П. В пяти образцах использовался адгезив ОТПК-5-С, в четырех — адгезив ОТПК-ЭД-3. Три образца, в которых использовался адгезив ВК-26М, являлись образцами сравнения.

После монтажа кристалла производилась герметизация корпуса по существующей технологии.

Расчет продолжительности ускоренных испытаний тестовых структур для подтверждения срока активного существования 15 лет проводился по методике, представленной в [11]. Значения средней энергии активации процесса отказов взяты из таблицы [11].

Величину энергии активации процесса отказов выбрали исходя из геометрических размеров затвора транзистора КМОП ИС, установленных в корпус Н14.42-1В. Размер затвора транзистора КМОП ИС более 1 мкм. Поэтому в расчетах использовались данные для строки КМОП ≥ 1 .

Согласно [12] клеевые соединения, выполненные адгезивом ВК-26М, выдерживают температуру 523 К в течение 500 ч, а температуру 573 К — в течение 100 ч. Адгезивы марки ОТПК-П должны обладать температурной стабильностью не хуже адгезива ВК-26М. Поэтому температура ускоренных испытаний была принята равной 473 К.

Расчет режимов ускоренных кратковременных (УКИБ) и длительных (УДИБ) испытаний на безотказность тестовых структур при температуре 473 К был проведен с использованием следующих данных:

– величина рассеиваемой мощности $P_{\text{рас}} = 1,5$ Вт;

– тепловое сопротивление кристалл–корпус $R_{\text{пер-корп}} = 20$ °С/Вт;

– температура испытаний (окружающей среды) $T_{\text{окр}} = 100$ °С.

Значение температуры кристалла $T_{\text{пер}}$ при испытаниях тестовых структур при температуре $T_{\text{окр}}$ определено, согласно [11], по формуле:

$$T_{\text{перКИБ}} = T_{\text{перДИБ}} = T_{\text{окр}} + R_{\text{пер-корп}} \times P_{\text{рас}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{пер-корп}}$ — тепловое сопротивление кристалл – корпус, °С/Вт;

$P_{\text{рас}}$ — мощность рассеяния в форсированном режиме, Вт;

$T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды в форсированном режиме, К.

Подставив численные значения в формулу (1), получили значение температуры кристалла в нормальном режиме:

$$T_{\text{КИБ}} = T_{\text{ДИБ}} = 100 \text{ °С} + 1,5 \text{ Вт} \times 20 \text{ °С/Вт} = 130 \text{ °С}.$$

Значение температуры кристалла $T_{пер}$ при ускоренных (форсированных) испытаниях тестовых структур при $T_{окр.ф} = 473$ К было определено по формуле:

$$T_{перУКИБ} = T_{перУДИБ} = T_{окр.ф} + R_{пер-корп} \times P_{рас}, \quad (2)$$

где: $R_{пер-корп}$ — тепловое сопротивление кристалл – корпус, °С/Вт;

$P_{рас}$ — мощность рассеяния в форсированном режиме, Вт;

$T_{окр.ф}$ — температура окружающей среды в форсированном режиме, °С.

Подставив численные значения в формулу (2), получили значение температуры кристалла при ускоренных испытаниях:

$$T_{перУКИБ} = T_{перУДИБ} = 200 \text{ °С} + 1,5 \text{ Вт} \times 20 \text{ °С/Вт} = 230 \text{ °С}.$$

Величина энергии активации процесса отказа выбрана согласно данным таблицы для КМОП $\geq 1,0$ мкм.

В соответствии с [11] значение коэффициентов ускорения при испытаниях УКИБ и УДИБ определено по формуле:

$$K_{УКИБ} = K_{УДИБ} = \exp \left[\frac{E_a}{k} \times \left(\frac{1}{T_{пер} + 273} - \frac{1}{T_{пер.ф} + 273} \right) \right], \quad (3)$$

где E_a — энергия активации механизмов отказов, эВ;

k — постоянная Больцмана, $8,6 \cdot 10^{-5}$, эВ/К;

$T_{пер}$ — температура кристалла (перехода) в нормальном режиме, °С;

$T_{пер.ф}$ — температура кристалла (перехода) в форсированном режиме, °С.

Так как $T_{пер}$ и $T_{пер.ф}$ лежат в разных диапазонах температуры (для которых в таблице указаны разные значения энергии активации), общий коэффициент ускорения равен произведению коэффициентов ускорения, рассчитанных для каждого диапазона температуры по формуле (3).

Подставив численные значения для указанных выше температурных диапазонов, получили численные значения коэффициентов ускорения K_1 , K_2 и K_3 , соответственно равные 2,489, 10,227 и 3,525.

Таблица. Значения энергии активации процесса отказов для групп интегральных микросхем при различных температурах кристалла [11]

Группа интегральных микросхем	Значение обобщенной энергии активации при разных температурах кристалла (перехода), эВ			
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}	E_{a4}
	25–70 °С	71–150 °С	151–200 °С	201–250 °С
Биполярные цифровые ТТЛ, ЭСЛ	0,3	0,4	0,5	0,6
Биполярные цифровые ТТЛ-Ш на <i>p</i> -МОП-структурах	0,3	0,5	0,6	0,7
Биполярные цифровые <i>n</i> -МОП-структуры, ПЗС	0,35	0,55	0,65	0,75
Биполярные цифровые И ² Л	0,4	0,6	0,7	0,8
КМОП $\geq 1,0$ мкм	0,45	0,65	0,8	0,9
КМОП 1,0–0,5 мкм	0,55	0,75	–	–
КМОП 0,5–0,09 мкм	0,6	0,8	–	–
Аналоговые	0,45	0,65	0,8	0,9

В таблице: ТТЛ — транзисторно-транзисторная логика; ЭСЛ — эмиттерно-связанная логика; ТТЛ-Ш — транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки; ПЗС — приборы с зарядовой связью; И²Л — интегрально-инжекционная логика; *n*- и *p*-МОП-структура металл–окисел–полупроводник с каналом *n*- и *p*-типа; КМОП-структура на кремнии металл–окисел–полупроводник.

Тогда согласно [11] общий коэффициент ускорения равен:

$$K_y = K_1 \times K_2 \times K_3, \quad (4)$$

$$K_y = 2,489 \times 10,227 \times 3,525 = 89,729.$$

Продолжительность ускоренных кратковременных испытаний на безотказность была определена по формуле

$$t_{\text{УКИБ}} = \frac{t_{\text{И}}}{K_y}, \quad (5)$$

где $t_{\text{И}} = 1000$ ч — продолжительность длительных испытаний на безотказность (ДИБ);

$K_{\text{УКИБ}}$ — коэффициент ускорения при УКИБ [11].

Подставив значения продолжительности ДИБ и коэффициента ускорения при УКИБ в формулу (5), получили

$$t_{\text{УКИБ}} = \frac{t_{\text{И}}}{K_y} = \frac{1000}{89,729} = 11,15 \text{ ч.}$$

Продолжительность ускоренных длительных испытаний на безотказность определили по формуле

$$t_{\text{УДИБ}} = \frac{t_{\text{ДИБ}} - t_{\text{И}}}{K_y}, \quad (6)$$

где $t_{\text{ДИБ}} = 131\,400$ ч — продолжительность длительных испытаний на безотказность;

$t_{\text{И}}$ — продолжительность ДИБ;

$K_{\text{УДИБ}}$ — коэффициент ускорения при УДИБ.

Подставив численные значения в формулу (6), получили

$$t_{\text{УДИБ}} = \frac{t_{\text{ДИБ}} - t_{\text{И}}}{K_y} =$$

$$= \frac{131\,400 - 1000}{89,729} = \frac{130\,400}{89,729} = 1453,27 \text{ ч.}$$

Тогда общее время проведения ускоренных испытаний, согласно [11], равно:

$$t_{\text{УИ}} = t_{\text{УКИБ}} + t_{\text{УДИБ}} =$$

$$= 11,15 + 1453,27 = 1464,42 \approx 1465 \text{ ч.}$$

Перед началом испытаний при повышенной температуре у всех элементов тестовых структур было измерено их сопротивление R_{0i} . Измерения

выполняли 4-зондовым методом с помощью цифрового миллиомметра GOM-802.

Выдержка тестовых структур при температуре 473 К проводилась в вертикальной камере тепла PV-212. Через каждые 100 ч тестовые структуры вынимали из камеры, охлаждали до комнатной температуры в течение 30–40 мин. После чего проводилось измерение сопротивления элементов тестовых структур 4-зондовым методом. Первый замер был проведен после выдержки в камере в течение 48 ч.

Результаты изменения сопротивлений элементов тестовой структуры представлены на графиках, построенных в полулогарифмическом масштабе, где ось X — время термообработки τ , ч, в логарифмическом масштабе; ось Y — $R_{\text{отн. } i}$, относительное изменение значения сопротивления i -го элемента, %, вычисленное по формуле:

$$R_{\text{отн. } i} = \frac{R_i - R_{0i}}{R_{0i}} \times 100 \%, \quad (7)$$

где i — номер элемента тестовой структуры, изменяется от 1 до 9;

R_{0i} — значение сопротивления i -го элемента перед началом испытаний.

На рис. 2–4 представлены результаты испытания тестовых структур при температуре 473 К в течение 1788 ч. На рис. 2 и 3 представлены результаты изменения сопротивления элементов тестовых структур, монтаж кристаллов которых осуществлялся адгезивами ОТПК-ЭД-3 (структура № 1) и ОТПК-5-С (структура № 6).

Аналогичные зависимости были получены у семи оставшихся образцов с адгезивами ОТПК-П. Как видно из представленных графиков, на начальном этапе испытания (до 248 ч) наблюдается снижение сопротивления резистивных элементов тестовых структур от 5 до 8%, затем при дальнейшем продолжении испытания наблюдается монотонный рост сопротивления элементов от 10 до 40% (вплоть до длительности испытания 748 ч), далее следует такое же уменьшение сопротивления (до продолжительности испытания 1088 ч) от 15 до 45%. При продолжении испытаний вплоть до 1788 ч наблюдалось постепенное уменьшение сопротивления элементов тестовых структур.

Такие же зависимости были получены на образцах сравнения, у которых монтаж кристаллов

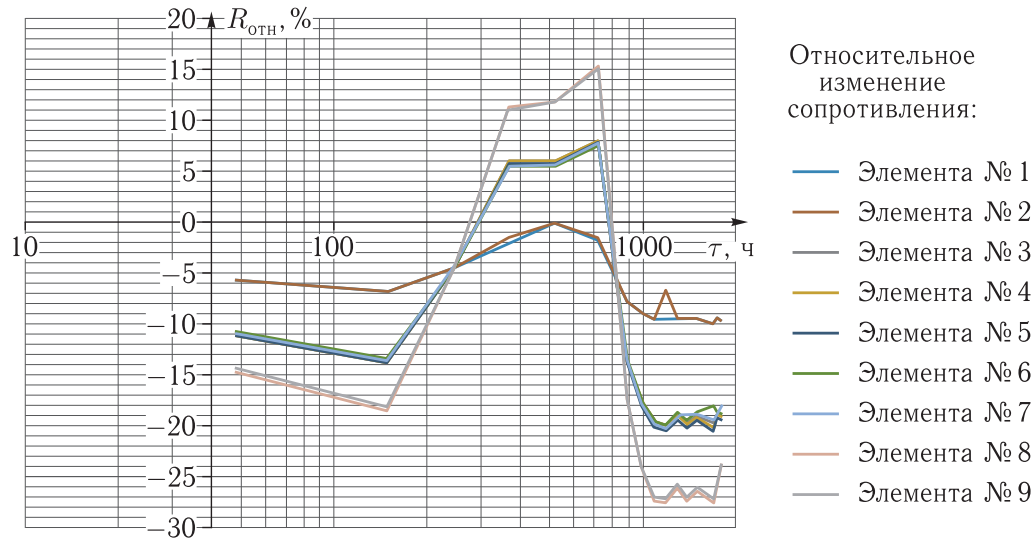


Рис. 2. Относительное изменение сопротивления элементов тестовой структуры №1 с адгезивом ОТПК-ЭД-3 при ускоренных испытаниях при температуре 473 К: № 1, № 2 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 8 мкм; № 3–№ 7 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 16 мкм; № 8, № 9 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 24 мкм

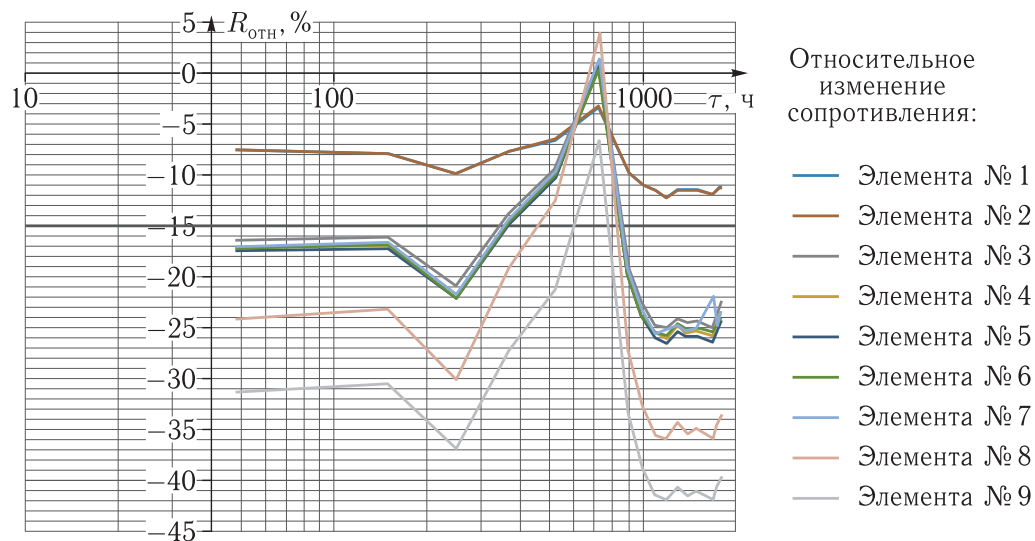


Рис. 3. Относительное изменение сопротивления элементов тестовой структуры №6 с адгезивом ОТПК-5-С при ускоренных испытаниях при температуре 473 К: № 1, № 2 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 8 мкм; № 3–№ 7 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 16 мкм; № 8, № 9 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 24 мкм

тестовых структур проводился с помощью адгезива ВК-26М. Данные по ускоренным испытаниям тестовой структуры №2, в которой использовался адгезив ВК-26М, представлены на рис. 4.

В результате проведения ускоренных испытаний у всех элементов тестовых структур наблюда-

лось уменьшение сопротивления резистивных элементов на 10–15% по сравнению с первоначальным, и выхода из строя ни одного элемента в тестовых структурах не наблюдалось. Таким образом, тестовые структуры как с адгезивом марки ОТПК-П, так и с адгезивом ВК-26М, выдержали

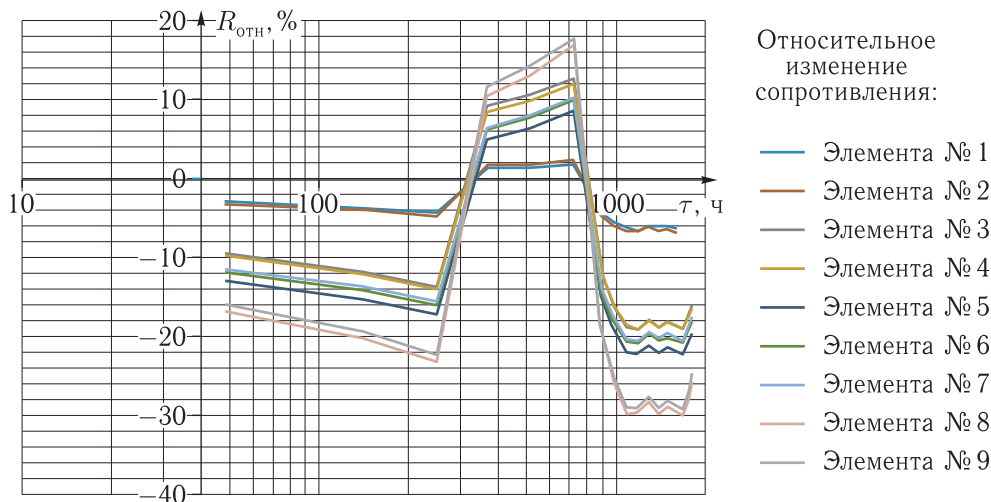


Рис. 4. Относительное изменение сопротивления элементов тестовой структуры №2 с адгезивом ВК-26М при ускоренных испытаниях при температуре 473 К: №1, №2 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 8 мкм; №3–№7 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 16 мкм; №8, №9 — изменения $R_{отн}$ резистивных элементов с шириной дорожки 24 мкм

ускоренные испытания при 473 К в течение 1465 ч, что должно соответствовать, согласно приведенным выше расчетам, САС 15 лет.

Уменьшение сопротивления резистивных элементов тестовых структур в процессе проведения испытания на начальном этапе обусловлено отжигом дефектов пленки алюминия, полученной при ионно-плазменном напылении. Кроме того, известно, что полученные пленки являются по своей структуре поликристаллическими, при этом зерна кристаллов покрыты естественным окислом с аморфной структурой [13]. Толщина окисла около 6 нм, и он представляет из себя фазу $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [13]. В ходе испытания (при нагреве) происходит фазовый переход — переход аморфной фазы $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в кристаллическую в виде $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. При переходе аморфной модификации в кристаллическую на поверхности частиц окиси алюминия исчезают химически активные центры, которыми могут быть участки с дефектами структуры или слабыми химическими связями Al–O. Это явление наблюдалось нами при длительности испытания более 248 ч — рост сопротивления резистивных элементов тестовых структур по мере перехода аморфной фазы в кристаллическую. Как известно, переход аморфной фазы в кристаллическую будет сопровождаться изменением объема за счет более плотной упаковки атомов, при этом будет происходить

растрескивание окисной пленки [13]. Кроме отжига дефектов в пленке алюминия в процессе испытания, будет происходить рост ее кристаллов, причем рост происходит за счет уменьшения доли мелких кристаллов. Изменение размеров кристаллов должно привести к уменьшению сопротивления пленки алюминия, что и наблюдается при длительности испытания свыше 1000 ч. На участке испытаний от 700 до 1000 ч, по всей видимости, заканчивается переход аморфной фазы в кристаллическую, все большую роль начинает играть процесс роста, в результате чего наблюдается монотонное уменьшение сопротивления резистивных элементов тестовых структур.

Таким образом, в результате проведения ускоренных испытаний тестовых структур с кристаллами, посадка которых проводилась на адгезивы ОТПК-ЭД-3 и ОТПК-5-С, установлено:

- применение указанных адгезивов для приклейки микроэлектронных устройств может обеспечить САС 15 лет. Однако полученные расчетно-экспериментальные данные требуют дополнительной проверки и подтверждения в части испытаний на механическую прочность клеевых соединений;
- изменение тестируемого параметра — сопротивления резистивного элемента из алюминиевой пленки в процессе испытания не превышает 10–15%.

Список литературы

1. Модель космоса: Науч.-инф. изд.: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Т. 1. Физические условия в космическом пространстве. М.: КДУ, 2007. 872 с.
2. Модель космоса: Науч.-инф. изд.: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. 1145 с.
3. *Севастьянов Н. Н., Андреев А. И.* Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации. Томск: ИД ТГУ, 2015. С. 266.
4. *Харламов М. С., Жуков А. А., Дидык П. И., Безмен В. П.* Деградиционные процессы в МЭМС-устройствах космического назначения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 3. С. 87–96.
5. *Строгонов А. В.* Оценка долговечности БИС по результатам ускоренных испытаний // Технологии электронной промышленности, 2007, № 3. С. 10–16.
6. *Колпаков А.* О термоциклах и термоциклировании // Силовая электроника, 2006, № 2. С. 6–11.
7. *Готра З. Ю.* Технология микроэлектронных устройств: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.
8. *Воронин И. В., Кондрашов Э. К.* Долговечность адгезионных связей полимерных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение, 1991, № 1. С. 25–26.
9. *Лукина Н. Ф., Петрова А. П.* Свойства и применение клеев в приборной технике // Клеи. Герметики. Технологии, 2005, № 11. С. 11–16.
10. *Гладких С., Степанов А., Антипина С.* Теплопроводящие электроизоляционные клеи для сборки изделий микроэлектроники // Печатный монтаж, 2017, № 3. С. 183–187.
11. ГОСТ Р 57394–2017 «Методы ускоренных испытаний на безотказность».
12. *Калисевич В. П., Антипова Т. И., Петрова А. П.* Опыт применения клеев при изготовлении магнитопроводов // Клеи. Герметики. Технологии, 2005, № 7. С. 30–32.
13. *Зенин В. В., Спиридонов Б. А., Землянский А. И., Бокарев Д. И.* Коррозионная стойкость алюминиевой металлизации кристаллов корпусов полупроводниковых изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2015, т. 11, № 6. С. 34–37.