

На правах рукописи

Титов Александр Валерьевич



ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Специальности

05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» и в ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научные руководители: д. ф.-м. н., профессор
Кузнецов Гений Владимирович

д. ф.-м. н., профессор
Мамонтов Геннадий Яковлевич

Официальные оппоненты: Анненков Юрий Михайлович
д. ф.-м. н., профессор,
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
профессор кафедры электромеханических
комплексов и материалов

Прибатурин Николай Алексеевич
д. т. н., профессор,
Институт теплофизики СО РАН, г. Новоси-
бирск, заместитель заведующего лабораторией
проблем тепломассопереноса

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет систем управления
и радиоэлектроники»

Защита состоится «11» апреля 2012 г. в 15⁰⁰ ч. на заседании диссертационно-го совета Д 212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «28» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Прогнозированию надежности элементов радиоэлектронного оборудования (РЭО) и электронной техники (ЭТ) уделяется все больше внимания в связи с увеличением тепловых и механических нагрузок на радиотехнические материалы (РТМ) и изделия.

В настоящее время методы прогнозирования надежности изделий радиоэлектроники основываются преимущественно на результатах статистического анализа ускоренных испытаний групп изделий. Опытные образцы испытывают под действием различных факторов (повышенных температур, высоких напряжений питания и др.), ускоряющих процессы старения в РТМ. Современные подходы к оценкам остаточной надежности радиотехнических материалов опираются, в основном, на статистические данные по отказам изделий радиоэлектронного оборудования определенного типа за большие интервалы времени. При этом, как правило, не рассматриваются конкретные физико-химические процессы в радиотехнических материалах, приводящие к снижению долговечности и надежности радиоэлектронных материалов и изделий.

Одной из основных причин снижения долговечности и надежности транзисторов и интегральных микросхем (ИС) является окисление металлических элементов и изделий. Установлено, что во многих случаях пластмассовые корпуса не защищают материалы полупроводниковых приборов (ППП) от проникновения влаги и воздуха при длительной эксплуатации. Типичные полимерные радиотехнические материалы (полиэтилен, стеклотекстолит, эпоксидные смолы и др.), используемые для изготовления корпусов ИС и изоляции металлических проводников, при длительной эксплуатации в условиях циклических и механических нагрузок часто растрескиваются (особенно при циклическом нагреве и охлаждении). Поэтому еще в 80-х годах прошлого столетия предпринимались попытки исследовать причины, механизмы и кинетику окисления алюминиевой металлизации интегральных микросхем в рабочих диапазонах изменения температур (Теверовский А.А., Волков С.И., Русанова А.Л., Горнев Е.С.). Однако эти работы не привели до настоящего времени к созданию какой-либо физической теории прогнозирования коррозионных отказов в микросхемах. По этим причинам, несмотря на гарантированную изготовителями высокую надежность ИС и стабильность выходных характеристик, в реальных условиях работы в микросхемах развиваются физико-химические процессы, под действием которых схемы выходят из строя (Русанова А.Л., Строгонов А.В., Борисов А.А., Горбачева В.М., Карташов Г.Д., Мартынова М.Н., Прытков С.Ф.).

Существующие в настоящее время методики (Строгонов А.В., Карташов Г.Д., Борисов А.А., Садыхов Г.С.) прогнозирования надежности РЭО и ЭТ не учитывают процессы окисления металлических радиотехнических материалов, скорость которых зависит от температуры экспоненциально.

До настоящего времени экспериментальный или теоретический анализ основных закономерностей окисления металлизации в радиотехнических материалах в условиях интенсивного теплопереноса не проводился.

Также ранее не исследовалась связь процесса окисления с основной характеристикой надежности радиоэлектронного оборудования – интенсивностью отказов.

Анализ состояния теоретических и практических подходов к прогнозированию долговечности радиотехнических материалов и надежности радиоэлектронного оборудования показывает, что в настоящее время существует объективная потребность в математических моделях, учитывающих комплекс взаимосвязанных термохимических (окислительных), теплофизических, диффузионных и электрических процессов, протекающих в радиотехнических материалах при их эксплуатации.

Цель работы и задачи исследования

Целью работы является разработка нового метода прогностического моделирования параметров надежности радиотехнических материалов и радиоэлектронных изделий, в основе которого лежит анализ процессов окисления металлов в условиях интенсивного тепломассопереноса, соответствующих реальным режимам эксплуатации РЭО и ЭТ.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1. Численное моделирование процессов окисления металлических РТМ, являющихся неотъемлемой частью радиоэлектронного оборудования при их работе с учетом реальных температур и условий массообмена.
2. Моделирование двумерных температурных полей в радиоэлектронном приборе (транзисторе, микросхеме) с учетом реальных условий теплообмена с внешней средой и окисления металлов.
3. Анализ изменения основной характеристики надежности радиоэлектронного оборудования и электронной техники – интенсивности отказов при развитии процессов окисления металлизации в условиях интенсивного воздействия внешней среды и реальных диапазонов изменения температур эксплуатации изделий.

Научная новизна работы

1. Разработан метод прогностического моделирования характеристик работоспособности металлических материалов и параметров надежности радиоэлектронного оборудования с учетом процессов окисления металлов в условиях эксплуатации.
2. Исследованы процессы окисления медных и алюминиевых проводников тока в условиях эксплуатации электронного оборудования. Установлена зависимость изменения показателя надежности радиоэлектронного оборудования во времени при окислении металла в условиях интенсивного тепломассообмена.
3. Установлен эффект саморазогрева металлических проводников радиоэлектронной аппаратуры, обусловленный их окислением, что в итоге приводит к отказам радиоаппаратуры.

4. Показано, что при влиянии воздушной атмосферы основным фактором, определяющим надежность радиоэлектронной аппаратуры является окисление токоведущих элементов схемы.

Практическая значимость работы

1. Предложенная экспресс-методика оценки надежности РЭО, позволяет прогнозировать время безотказной работы при окислении металлических проводников в условиях интенсивного тепломассообмена.

2. Предложено для сохранения уровня надежности и долговечности радиоэлектронных изделий покрывать токоведущие элементы электронных схем влагозащитными лаками и красками через каждые 1,5-2 года эксплуатации.

3. Результаты работы используются в научной и производственной деятельности компании «НПК ИНТЭК», занимающейся производством навигационной аппаратуры и других систем и комплексов в области безопасности, навигации и связи.

Защищаемые положения.

1. Новая методика прогностического моделирования параметров надежности изделий электронной техники под влиянием окисления металлических элементов в условиях интенсивного тепломассообмена с окружающей средой.

2. Масштабы влияния комплекса физико-химических процессов, протекающих при окислении металлических радиотехнических материалов, на долговечность этих материалов зависят от режимов и условий эксплуатации электронного прибора.

3. Процессы окисления токоведущих элементов электронных схем являются преобладающей причиной отказов радиотехнических материалов и изделий электронной техники при образовании трещин в корпусе электронного прибора.

Достоверность полученных результатов

Обоснована контролем выполнения условия консервативности разностной схемы (закон сохранения энергии) и проведением комплекса тестовых расчетов на последовательности сгущающихся сеток по пространственным и временным координатам. Процесс выбора соответствующих параметров проводился до достижения условий, когда результаты решения – разница температур этих двух решений составляла менее 1%.

Личный вклад автора.

Состоит в постановке задачи, разработке метода и алгоритма её решения, проведении численного анализа исследуемых процессов, обработке и обобщении результатов теоретических исследований, формулировке выводов и заключения по диссертации.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II Международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в нефтега-

зовой отрасли и образовании» – Тюмень 2006 г.; V всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» – Томск 2006 г.; XII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» – Томск 2006 г.; Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системная интеграция и безопасность» – Томск 2007 г.; Международной конференции «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» – Томск 2007 г.; IV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития» – Томск 2007 г.; VI Минском Международном форуме по тепломассообмену – Минск 2008 г.; Международной научно-практической конференции «Передовые технические системы и технологии» – Севастополь 2007, 2008 гг.; VII Всероссийском семинаре вузов по теплофизике и энергетике – Кемерово 2011 г.; Международной молодежной научной школе «Энергия и человек» – Томск 2011 г.

Публикации.

По направлению диссертационной работы автором опубликовано 10 работ, в том числе: 2 статьи в журналах рекомендованных ВАК, а также получено два авторских свидетельства о регистрации программной разработки в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование».

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 94 наименований и содержит 32 рисунка. Общий объем диссертации 127 стр.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, отражена научная новизна и практическое значение полученных результатов.

В первой главе проведен аналитический обзор современного состояния математических и физических моделей, описывающих изменение характеристик надежности радиотехнических материалов, являющихся неотъемлемой частью радиоэлектронного оборудования в реальных условиях эксплуатации этого оборудования. В этой главе обосновывается необходимость разработки нового подхода к прогнозированию характеристик надежности РТМ и изделий на их основе путем численного моделирования процессов окисления металлических радиотехнических материалов при эксплуатации РЭО и ЭТ.

Во второй главе сформулирована математическая модель процессов окисления медных и алюминиевых радиотехнических материалов в условиях интенсивного тепломассообмена с внешней средой.

Рассматривалась задача окисления в условиях тепломассопереноса в проводнике, покрытом изоляцией, в декартовой системе координат. Областью решения являлась двухслойная (металл–полимер) пластина. В полимерном защитном покрытии рассматривалась микротрещина (рис. 1). Проводник нагревался за счет движения электрических зарядов.

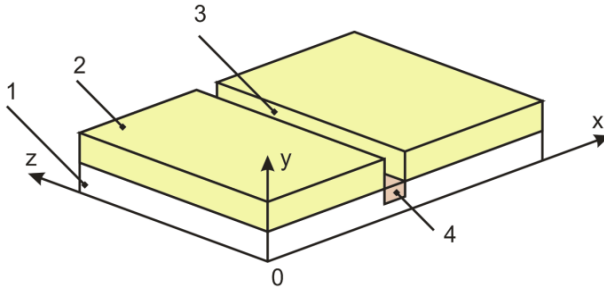


Рис. 1. Металлический проводник, покрытый изоляцией: 1 – металл; 2 – изоляция; 3 – микротрещина; 4 – слой окисла

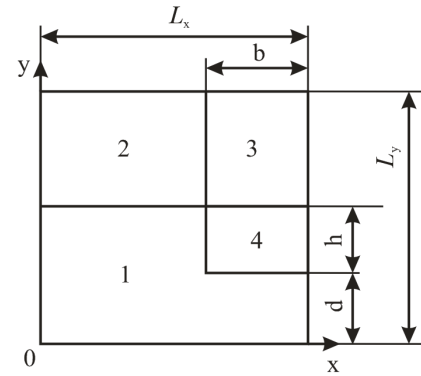


Рис. 2. Область решения задачи окисления в условиях интенсивного теплопереноса для металлического проводника с дефектом изоляции: 1 – металл; 2 – изоляция; 3 – воздух; 4 – пленка окисла

Область решения по осям x , y ограничивалась значениями L_x , L_y соответственно и включала в себя несколько зон с различными характеристиками и размерами (рис. 2).

При постановке задачи приняты следующие допущения: 1) диапазон температур, в котором проводилось исследование, ограничивался от 253 до 383 К; 2) радиотехнические материалы считались изотропными.

В такой постановке задача сводилась к решению следующих уравнений:

$$\rho_4 \frac{\partial h}{\partial t} = \Omega_1 \rho_3 n_1 \frac{\theta d^2}{h(d+h)^2};$$

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_4}\right);$$
(1)

$$C_k \cdot \rho_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \cdot \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} \right) + Q, \text{ при } k = 1;$$
(2)

$$C_k \cdot \rho_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \cdot \left(\frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} \right), \text{ при } k = 2, \dots, 4;$$
(3)

где h – толщина оксидной пленки; d – толщина металла; θ – константа скорости химической реакции; θ_0 – предэкспоненциальный множитель; n_1 – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности металла; E_1 – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; h_0 – начальная толщина оксидной пленки; $\Omega_1 = M_4 v_4 / M_3 v_3$ – отношение массовых стехиометрических коэффициентов, M_3 , M_4 – молярные массы кислорода и оксида; v_3 , v_4 – стехиометрические коэффициенты; C_k – удельная теплоемкость; ρ_k – плотность; T_k – температура; λ_k – коэффициент теплопроводности; k – номер зоны, $k=1, \dots, 4$; Q – удельное тепловыделение источника; x , y – пространственные координаты; t – время.

Интенсивность удельного тепловыделения в проводнике рассчитывалась следующим образом:

$$Q = \frac{I^2 \cdot R(T_1) \cdot \tau}{S \cdot L_x} + Q_2; \quad R(T_1) = R_0[1 + \beta(T_1 - T_0)]; \quad R_0 = \frac{\gamma \cdot L_x}{S}, \quad (4)$$

где I – ток в проводнике; $R(T_1)$ – сопротивление проводника; τ – шаг расчета по времени; Q_2 – тепловой эффект реакции окисления; R_0 – сопротивление проводника при температуре $T_0 = 273$ К; γ – удельное сопротивление проводника; L_x – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника; β – температурный коэффициент сопротивления проводника.

Область решения ограничивалась следующими временными и геометрическими условиями:

$$t \in [0; t_m], \quad x \in [0; L_x], \quad y \in [0; L_y], \quad (5)$$

где t_m – максимальное время работы прибора; L_x , L_y – размеры области решения по осям x , y соответственно.

При задании начальных условий принималось, что температура области решения в начальный момент времени распределена равномерно:

$$T_k = T_s, \quad h = h_0 \quad \text{при} \quad t = 0, \quad (6)$$

где T_s – температура окружающей среды.

В граничных условиях учитывался конвективный и радиационный теплообмен, а коэффициент конвективного теплообмена являлся функцией температуры:

$$x = 0; \quad y \in [0; d + h]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

$$x = 0; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0; \quad (8)$$

$$x = [L_x - b]; \quad y \in [d; d + h]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \quad T_1 = T_4; \quad (9)$$

$$x = [L_x - b]; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \quad T_2 = T_3; \quad (10)$$

$$x = L_x; \quad y \in [0; d]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0; \quad (11)$$

$$x = L_x; \quad y \in [d; d + h]; \quad \frac{\partial T_4}{\partial x} = 0; \quad (12)$$

$$x = L_x; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \frac{\partial T_3}{\partial x} = 0; \quad (13)$$

$$y = 0; \quad x \in [0; L_x]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0; \quad (14)$$

$$y = d; \quad x \in [L_x - b; L_x]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}; \quad T_1 = T_4; \quad (15)$$

$$y = d + h; \quad x \in [0; L_x - b]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \quad T_1 = T_2; \quad (16)$$

$$y = d + h; \quad x \in [L_x - b; L_x]; \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}; \quad T_3 = T_4; \quad (17)$$

$$y = L_y; \quad x \in [0; L_x - b]; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha(T_2)(T_\epsilon - T_2) + \varepsilon \sigma (T_\epsilon^4 - T_2^4); \quad (18)$$

$$y = L_y; \quad x \in [L_x - b; L_x]; \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \alpha(T_3)(T_\epsilon - T_3) + \varepsilon \sigma (T_\epsilon^4 - T_3^4); \quad (19)$$

где $\alpha(T_k)$ – коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой; ε – приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Для описания коэффициента конвективного теплообмена внешней поверхности тела с окружающей средой в диапазоне температур 253–383 К использовалась зависимость $\alpha(T_k)$, предложенная Г.Н. Дульневим [1].

Приведенный коэффициент черноты поверхности зон и окружающей среды вычислялся по формуле:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{\varepsilon_k} + \frac{1}{\varepsilon_\epsilon} - 1 \right)^{-1} \quad (20)$$

где ε_k – коэффициент черноты поверхности зоны; ε_ϵ – коэффициент черноты окружающей среды.

Система дифференциальных нелинейных уравнений (1-3) с соответствующими начальными (6) и нелинейными граничными условиями (7–19) решены методом конечных разностей на неравномерной сетке. Для решения разностных аналогов двумерных уравнений использована схема расщепления по координатам в сочетании с методом итераций. Одномерные разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы аппроксимации.

На каждом шаге расчета температур проводился контроль консервативности разностной схемы.

Аналогичная задача окисления в условиях теплопереноса рассматривалась в покрытом изоляцией проводнике круглого поперечного сечения, который являлся частью электронной схемы. Задача решена в цилиндрической системе координат.

Уменьшение площади поперечного сечения металлических напылений за счет окисления приводит к изменению электрических режимов работы электронной схемы, и соответственно надежности электронного прибора. Уменьшение сечения проводника тока при постоянстве последнего влечет за собой возрастание интенсивности тепловыделения, которое в свою очередь интенсифицирует процессы окисления в металле.

Стехиометрические уравнения реакций окисления:



Скорость химической реакции металла с кислородом рассчитывалась с помощью выражения [2]:

$$W = \frac{\theta}{h} \rho_3 n_1, \quad \theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_4}\right). \quad (23)$$

Здесь W – скорость химической реакции по окислителю (кислороду), она прямо пропорциональна концентрации окислителя n_1 и обратно пропорциональна толщине оксидной пленки h ; θ – константа скорости химической реакции; θ_0 – предэкспоненциальный множитель; n_1 – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности металла; E_1 – энергия активации процесса окисления; R – универсальная газовая постоянная; T_4 – температура окисла.

Относительная массовая концентрация кислорода на поверхности металла находилась из условия равенства массового потока кислорода к поверхности и скорости его потребления в химических превращениях [2]:

$$n_1 = n_2 \left(\frac{\theta d^2}{h \phi (d+h)^2} + 1 \right)^{-1}, \quad \phi = \frac{\text{Nu}_H D}{d+h}, \quad D = \frac{\lambda_3}{C_3 \rho_3}, \quad (24)$$

где n_2 – относительная массовая концентрация кислорода в воздухе; d – толщина проводника в области окисления; ϕ – коэффициент массообмена; Nu_H – диффузионный критерий Нуссельта; D – коэффициент диффузии кислорода в воздухе.

Плотность химического тепловыделения реакции окисления на поверхности металла определялась выражением

$$q = Q_2 \cdot W = Q_2 \frac{\theta}{h} \rho_3 n_2 \left(\frac{\theta}{h \phi (d+h)^2} + 1 \right)^{-1}, \quad (25)$$

где Q_2 – тепловой эффект реакции, рассчитанный на единицу массы кислорода, Дж/кг.

Согласно (23), изменение толщины оксидной пленки на поверхности металла во времени описывалось дифференциальным уравнением:

$$\rho_4 \frac{\partial h}{\partial t} = \Omega_1 \rho_3 n_1 \frac{\theta d^2}{h(d+h)^2}, \quad \Omega_1 = M_4 \nu_4 / M_3 \nu_3, \quad h_{(t=0)} = h_0. \quad (26)$$

где M_1 , M_3 , M_4 – молярные массы металла, кислорода и оксида соответственно; ν_1 , ν_3 , ν_4 – стехиометрические коэффициенты; h_0 – начальная толщина оксидной пленки.

Дифференциальное уравнение для описания изменения толщины металла:

$$-\frac{1}{2} \rho_1 \frac{\partial d}{\partial t} = \Omega_2 \rho_3 n_1 \frac{\theta}{h}, \quad \Omega_2 = M_1 \nu_1 / M_3 \nu_3, \quad d_{(t=0)} = d_0. \quad (27)$$

где d_0 – начальная толщина металла.

-
2. Орловская С.Г., Калинин В.В., Грызунова Т.В., Копыт Н.Н. Высокотемпературный теплообмен и кинетика окисления металлической частицы в воздухе // Химическая физика, 2004, Т. 23, № 3, С. 49-55.

Значения параметров θ_0 , E_1 (23) процесса окисления металлов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Числовые характеристики процесса окисления металлов [3]

Металл	θ_0	E_1 , эВ
Медь	0,1	0,41
Алюминий	0,15	0,47

На рис. 3 приведена зависимость толщины окисной пленки на медном проводнике электронного прибора от времени при $\alpha=1$ Вт/(м²·К); 1 – $T_B=253$ К; 2 – $T_B=273$ К; 3 – $T_B=293$ К; 4 – $T_B=313$ К

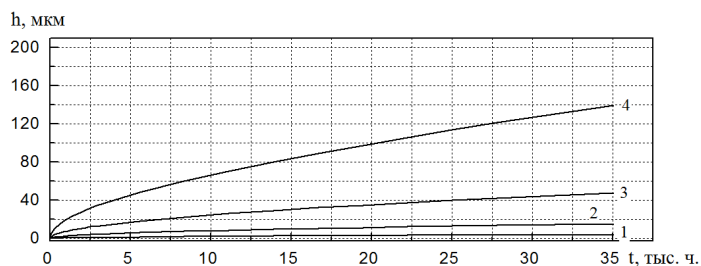


Рис. 3. Зависимость толщины окисной пленки на металле от времени при $\alpha=1$ Вт/(м²·К); 1 – $T_B=253$ К; 2 – $T_B=273$ К; 3 – $T_B=293$ К; 4 – $T_B=313$ К

В **третьей главе** представлены результаты исследования влияния окисления РТМ в условиях интенсивного тепломассопереноса в рассматриваемой (рис. 2) области на характеристики надежности материалов металлизации ИС.

Объектами исследования были широко распространенные компоненты радиоэлектронного оборудования и электронной техники: типичный биполярный транзистор КТ819А; интегральные микросхемы К174УНЗ, К175УВ1А (рис. 4.).

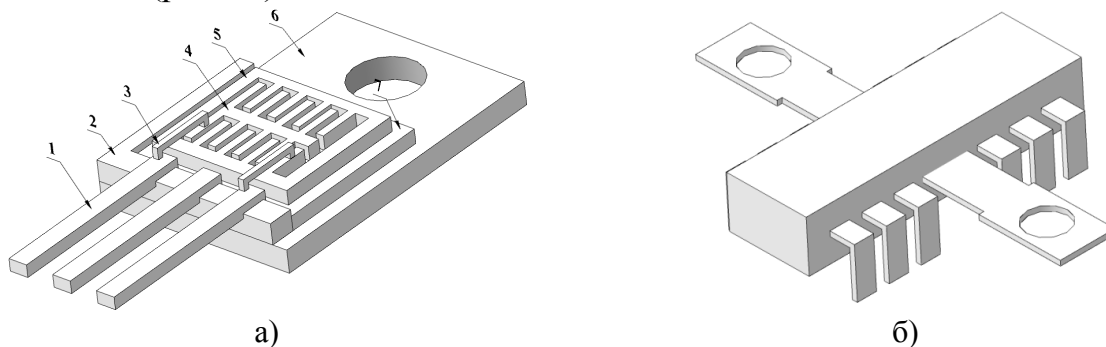


Рис. 4. Электронные приборы: а) транзистор КТ819А; б) микросхема К174УНЗ

В качестве примера рассмотрен типичный и широко распространенный низкочастотный транзистор КТ819А большой мощности, выполненный в металлопластиковом корпусе ТО-220 (рис. 4а). Этот электронный прибор используется как силовой элемент стабилизатора напряжения.

Анализ режимов работы электронного прибора проведен с использованием пакета схемотехнического моделирования Micro-Cap 8.

В программе моделировалась работа электронного устройства. Вычислялись значения постоянных токов в электронной схеме. Значения тока использовались для расчета интенсивности удельного тепловыделения в проводнике (4).

Интенсивность отказов РЭО определяли по математической модели основанной на известном уравнении Аррениуса, которая учитывает температуру эксплуатации изделия.

$$\mu(T) = Ce^{-E/kT} \quad (28)$$

где C – константа; E – энергия активации; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Объем представленной в [4] информации по формальным параметрам, характеризующим надежность зарубежных интегральных микросхем, полупроводниковых приборов и других ЭРИ иллюстрирует значимость рассматриваемого аппроксимационного выражения для моделирования характеристик надежности элементной базы РЭА по мнению сотрудников ЦНИИ № 22 Министерства Обороны РФ [4].

Параметры E и C определены для доминирующего вида дефектов в ЭРИ – процессов окисления металла [4]. Проведены численные исследования процессов окисления в металлах радиоэлектронных компонентов, совместно с моделированием процессов теплопереноса в области решения. Спрогнозированы характеристики надежности РЭА по модели Аррениуса (28). Также выполнены численные исследования процессов теплопереноса в проводниках тока без дефектов изолирующего слоя и оценка характеристик надежности этих РЭО.

Решена задача окисления металлических элементов и соответствующего изменения характеристик надежности в условиях интенсивного теплообмена транзистора с окружающей средой.

Численное моделирование характеристики надежности РЭО – интенсивности отказов при окислении металлических радиотехнических материалов в условиях интенсивного теплопереноса проводились впервые.

Ниже (рис. 5-11) приведены типичные результаты численного анализа, выполненного для достаточно типичных параметров эксплуатации современного радиоэлектронного оборудования и электронной техники: температура окружающей среды изменялась от $T_b=253$ до $T_b=313$ К, время эксплуатации электронного прибора до 4 лет, размеры области решения варьировались от $z=0,6$ мм; $d+h=0,2$ мм; $L_x=0,4$ мм; $L_y=0,4$ мм; $b=40$ мкм, до $z=4$ мкм; $d+h=2$ мкм; $L_x=4$ мкм; $L_y=4$ мкм; $b=2$ мкм, проводник нагревался под действием начального тока до $I=0,5$ А. Численное моделирование велось на неравномерной сетке по координатам x , y . Шаг сетки изменялся от некоторого минимального значения $h_{\min}$ в геометрической прогрессии. Сетка сгущалась на

границах между элементами. Начальная температура принималась равной температуре окружающей среды. Шаг по времени составлял до 1 мс. Коэффициент конвективной теплоотдачи изменялся от $\alpha=1$ до $\alpha=4$ Вт/(м²·К).

Типичные распределения температур в проводнике транзистора с дефектом корпуса прибора представлены на рис. 5.

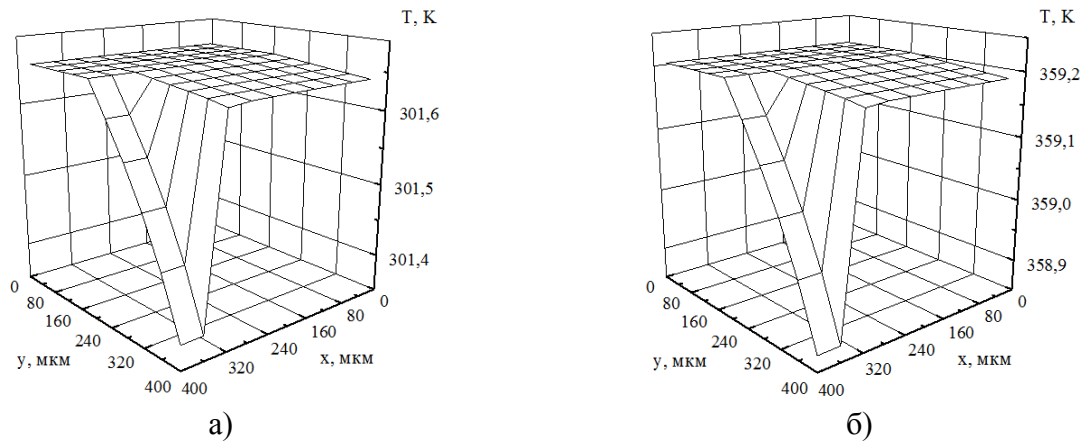


Рис. 5. Поле температур в проводнике транзистора с дефектом защитного покрытия при $t=10$ тыс. с., $\alpha=1$ Вт/(м²·К): а) $T_в=253$ К; б) $T_в=300$ К

Установлено, что в целом температурное поле в проводнике является почти однородным. Перепад температур по области решения составляет не более 0,3 К. Объясняется это малыми линейными размерами области решения и высокой теплопроводностью металла.

Зависимость температуры проводника от времени работы прибора при различных значениях температуры окружающей среды в условиях умеренного охлаждения представлена на рис. 6.

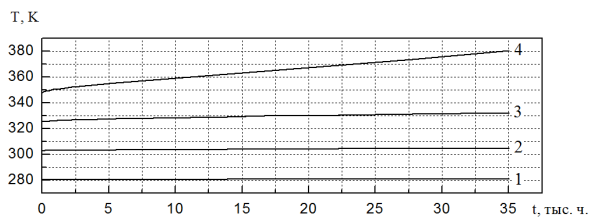


Рис. 6. Зависимость температуры проводника транзистора с дефектом защитного покрытия от времени при $\alpha=1$ Вт/(м²·К); 1 – $T_в=253$ К; 2 – $T_в=273$ К; 3 – $T_в=293$ К; 4 – $T_в=313$ К

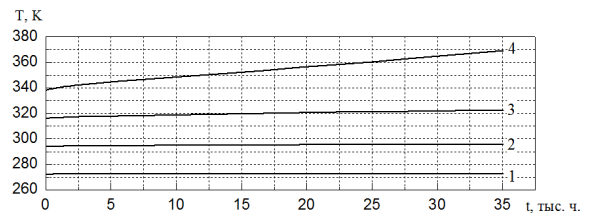


Рис. 7. Зависимость температуры проводника транзистора без дефекта изолирующего слоя от времени при $\alpha=1$ Вт/(м²·К); 1 – $T_в=253$ К; 2 – $T_в=273$ К; 3 – $T_в=293$ К; 4 – $T_в=313$ К

Зависимость температуры проводника РЭО без дефекта изолирующего слоя от времени его работы при различных значениях температуры окружающей среды в условиях умеренного охлаждения представлена на рис. 7.

Как и следовало ожидать, эксплуатационные температуры электронного прибора (рис. 6 и 7) существенно отличаются (на 10 градусов Кельвина). Объясняется это тем, что во первых при окислении металлов выделяется дополнительная энергия химической реакции, во вторых уменьшается площадь сечения проводника тока, что при постоянном токе способствует интенсификации тепловыделения. Также следует заметить, что повышение эксплуатационной температуры электронного прибора на 10 градусов снижает его надежность (увеличивается интенсивность отказов) в два раза [4].

Типичная зависимость толщины окисной пленки металла от времени эксплуатации представлена на рис. 3.

По результатам численных исследований установлено, что по мере роста слоя окисла металла (рис. 3) растет интенсивность разогрева проводника, температура (рис. 6) и скорость окисления, т. е. процесс, является самоускоряющимся. При этом пленка окисла тормозит процесс подвода окислителя к поверхности металла. В итоге саморазогрев проводника не является слишком интенсивным. Однако, этот процесс в итоге может привести к разрыву цепи тока и отказу изделия. Толщина оксидной пленки металла заметно растет при увеличении температуры эксплуатации проводника. Так, например повышение температуры окружающей среды на 60 К приводит к увеличению толщины оксидной пленки на металле (рис. 3) в 30 раз при $t=35$ тыс. часов работы. Это может существенно повлиять на надежность и режимы работы электронных схем.

Полученные зависимости температуры проводника в условиях окисления от времени эксплуатации электронного прибора использовались для расчета показателей надежности РЭО и ЭТ с помощью модели Аррениуса. Также рассчитывались $\mu(t)$ электронных приборов без повреждения защитного изоляционного слоя.

На рис. 8 и 9 приведены зависимости интенсивности отказов транзистора КТ819А от времени при различных условиях эксплуатации. Видно, например, что при температуре внешней среды $T_B=300$ К и уменьшении коэффициента α от 4 до 1 Вт/(м²•К) окисление приводит к увеличению интенсивности отказов РЭО с дефектом изоляции полупроводникового прибора почти в десять раз рис. 8. При слабом конвективном теплообмене электронного прибора с окружающей средой и росте температуры T_B от 253 до 313 К параметр надежности μ РЭО и ЭТ может увеличиваться в тысячу раз и более при окислении металла полупроводникового прибора (рис. 3).

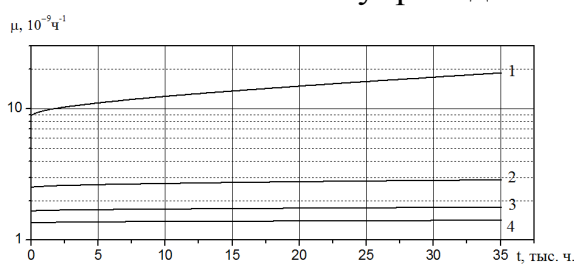


Рис. 8. Изменение во времени при окислении РТМ интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике ($T_B=300$ К; 1 – $\alpha=1$ Вт/(м²•К); 2 – $\alpha=2$ Вт/(м²•К); 3 – $\alpha=3$ Вт/(м²•К); 4 – $\alpha=4$ Вт/(м²•К))

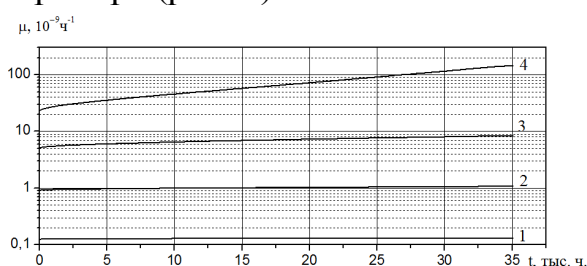


Рис. 9. Изменение во времени при окислении РТМ интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике ($\alpha=1$ Вт/(м²•К); 1 – $T_B=253$ К; 2 – $T_B=273$ К; 3 – $T_B=293$ К; 4 – $T_B=313$ К).

Рассмотрен неблагоприятный режим работы электронного прибора ($T_B=313$ К, $\alpha = 1$ Вт/(м²•К)). В этом случае конвективный тепловой поток от проводника в окружающую среду минимален, а температура окружающей среды максимальна. В результате температура транзистора существенно возрастает, а площадь поперечного сечения проводника из-за процессов интен-

сивного окисления уменьшается. Толщина оксидной пленки достигает $h=140$ мкм (рис. 3), а температура проводника 380 К рис. 6.

Из рис. 9 видно, что процесс окисления металла ППП с дефектом изоляции существенно увеличивает интенсивность отказов электронного прибора и радиоэлектронного оборудования (в тысячу и более раз). Дальнейшая эксплуатация РЭО и ЭТ с предельными рабочими температурами может привести к полному окислению проводника, что вызовет отказ электронного прибора.

На рис. 10 и 11 приведены зависимости интенсивности отказов электронного прибора без повреждения защитного изоляционного слоя от времени при различных условиях эксплуатации.

Как и следовало ожидать, процесс окисления в условиях интенсивного теплопереноса в металле приводит к заметному снижению надежности исследуемых ЭРЭ.

Все полученные результаты соответствуют режиму работы проводника при наличии одной трещины в изоляции. На практике чаще трещины образуются группами на поверхности полимера и формируют сетку трещин. В этом случае эффект окисления металла может приводить к существенно более раннему изменению показателей надежности радиотехнических материалов и изделий на их основе.

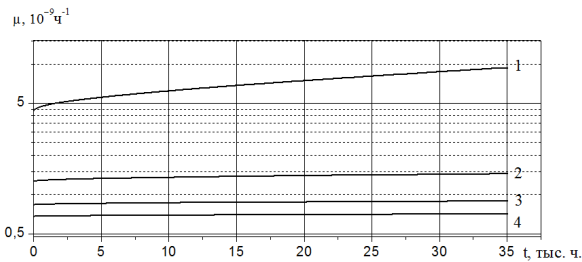


Рис. 10. Изменение во времени при интенсивном теплопереносе в РТМ интенсивности отказов электронного прибора без повреждения защитного изоляционного слоя ($T_b=300$ К; 1 – $\alpha=1$ Вт/(м²•К); 2 – $\alpha=2$ Вт/(м²•К); 3 – $\alpha=3$ Вт/(м²•К); 4 – $\alpha=4$ Вт/(м²•К))

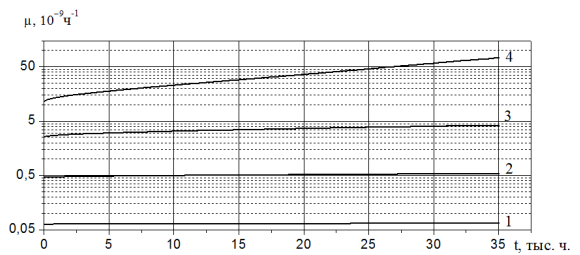


Рис. 11. Изменение во времени при интенсивном теплопереносе в РТМ интенсивности отказов электронного прибора без повреждения защитного изоляционного слоя ($\alpha=1$ Вт/(м²•К); 1 – $T_b=253$ К; 2 – $T_b=273$ К; 3 – $T_b=293$ К; 4 – $T_b=313$ К).

На основании результатов математического моделирования процессов окисления в системе «проводник – слой окисла – изолятор – окружающая среда» можно сделать вывод, что окисление токопроводящих элементов приводит к значительному ухудшению показателей надежности типичных радиотехнических материалов, радиоэлектронного оборудования и изделий ЭТ.

Масштабы выделенного эффекта при эксплуатации радиотехнических материалов определяются временем их работы в неблагоприятных условиях (климатические факторы, повышенные температуры). Полученные результаты являются основанием для объективной оценки ухудшения характеристик радиотехнических материалов в реальных условиях эксплуатации под действием химически активной окружающей среды и повышенной температуры.

Разработанная математическая модель и метод численного анализа могут быть использованы для оценки масштабов снижения показателей надежности радиоэлектронного оборудования при работе и в других окислительных средах.

Результаты выполненных численных исследований показывают перспективность предложенного в диссертации подхода к анализу надежности радиотехнических материалов в условиях их окисления. Важнейшим достоинством предложенного подхода является то, что для реализации процесса моделирования показателей надежности радиотехнических материалов и изделий на их основе не требуется проводить каких-либо специальных экспериментов и определять эмпирические постоянные, которые в многих аналогичных моделях являются по существу коэффициентами согласования разработанной теории и реальной практики. Для реализации представленных в диссертации математических моделей достаточно информации о теплофизических характеристиках радиотехнических материалов, используемых для изготовления, например, микросхем, и постоянных, характеризующих окисление металлов в воздушной среде. Разработанная при написании диссертации теория является по существу автономной. Коэффициенты диффузии в воздухе также определены к настоящему времени для достаточно широкого диапазона изменения основных параметров, характеризующих специфику процессов массопереноса в конкретных условиях.

Важным, по мнению автора также является то, что разработанный в диссертации подход и соответствующие математические модели могут быть развиты на достаточно широкий круг приложений в радиоэлектронной и электронной технике.

Заключение

1. Предложена новая методика прогностического моделирования характеристик параметрической надежности радиотехнических материалов и изделий, в основе которой лежит анализ реальных физико-химических процессов окисления в условиях интенсивного тепломассопереноса, протекающих при работе радиоэлектронного оборудования и электронной техники.

2. Методика прогностического моделирования характеристик параметрической надежности РТМ позволяет определять время безотказной работы исследуемых электронных приборов.

3. Впервые поставлена и решена задача процессов окисления металла с учетом интенсивного нестационарного теплопереноса в металлических РТМ, являющихся неотъемлемой частью радиоэлектронного оборудования.

4. Впервые проведено численное моделирование основной характеристики надежности радиоэлектронных материалов и оборудования – интенсивности отказов, с учетом протекания окислительных процессов в РТМ. Так например установлено, что, процесс окисления металла в дефектной интегральной микросхеме усилителя звуковой частоты, работающей при температуре окружающей среды 40°C и слабом конвективном теплообмене электронного прибора с окружающей средой может увеличивать ее интенсив-

ность отказов μ и радиоэлектронного оборудования в целом в шестьдесят пять раз.

5. Разработанная методика прогностического моделирования показателей параметрической надежности радиотехнических материалов и изделий на их основе может быть использована для оценки надежности проектируемого и введенного в эксплуатацию радиоэлектронного оборудования и электронной техники; дополнения существующих и используемых методик прогнозирования надежности радиоэлектронного оборудования и электронной техники; оптимизации процесса выбора радиотехнических материалов на этапе проектирования.

Публикации по теме диссертации

1. Кузнецов Г.В., Титов А.В. Математическое моделирование характеристик надежности типичных элементов РЭА // «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании» Сб. материалов II Международной научно-технической конференции. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2006.-270с.

2. Титов А.В. Математическое моделирование характеристик надежности радиотехнических систем // Материалы докладов пятой Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» Томск. Изд-во: ТГУ, 2006. -420 с.

3. Титов А.В., Мамонтов Г.Я. Прогнозирование характеристик надежности радиотехнических систем // Материалы двенадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. -465 с.

4. Титов А.В. Численное моделирование характеристик надежности радиоаппаратуры // Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Системная интеграция и безопасность». – Томск: Изд-во «В-Спектр», 2007. Ч. 1. -364 с.

5. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Титов А.В. Анализ влияния интенсивности тепломассообмена в радиоэлектронной аппаратуре на надежность ряда ее элементов // Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития: Доклады Международной научно-практической конференции. – Томск: В-Спектр, 2007. В 2 ч. Ч. 1. -326 с.

6. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Титов А.В. Численное моделирование одного из механизмов влияния интенсивности тепломассообмена в радиоэлектронной аппаратуре на надежность ряда ее элементов // Науч. изд. Тезисы докладов и сообщений VI Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск, 2008, В 2 Т. Т. 1. С. 272-274.

7. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Титов А.В. Оценка надежности типичного транзистора в условиях окисления металла // Известия Томского политехнического университета, 2008, №4, С. 135–140.

8. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Титов А.В. Численный анализ влияния окисления медного проводника на его параметры // Электромагнитные волны и электронные системы. Издательство Радиотехника, 2009, №1,

С. 25–30.

9. Титов А.В., Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я. Электронный информационный образовательный ресурс: <Программа расчета температурных полей и окисления металла в радиоэлектронных приборах TFTA v.1.0> // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», № 4, 2011. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2011/4.doc>. (дата обращения: 04.04.2011).

10. Титов А.В. Электронный информационный образовательный ресурс: <Динамика окисления проводника в тепловом поле TDTF v.1.0> // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», № 4, 2011. URL: <http://ofernio.ru/portal/newspaper/ofernio/2011/4.doc>. (дата обращения: 07.04.2011).