

ГОУ ВПО Томский государственный архитектурно-строительный  
университет  
ФГБОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический  
университет

На правах рукописи

Титов Александр Валерьевич



ВЛИЯНИЕ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ  
МАТЕРИАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ  
РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научные руководители:

доктор физико-математических наук  
профессор Г.В. Кузнецов

доктор физико-математических наук  
профессор Г.Я. Мамонтов

Томск-2012

### Перечень используемых сокращений

РЭО – радиоэлектронное оборудование;  
 РТМ – радиотехнические материалы;  
 ИС – интегральная схема;  
 ППП – полупроводниковый прибор;  
 СВЧ – сверхвысокие частоты;  
 ЭДС – электродвижущая сила;  
 МОП – металл-оксид-полупроводник;  
 МДП – металл-диэлектрик-полупроводник;  
 рН – кислотно-щелочной баланс;

### Перечень используемых обозначений

$x, y$  – пространственные координаты;  
 $L_x, L_y$  – размеры области решения по осям  $x, y$  соответственно;  
 $C_k$  – удельная теплоемкость материала;  
 $\rho_k$  – плотность материала;  
 $T_k$  – температура материала;  
 $\lambda_k$  – коэффициент теплопроводности материала;  
 $k$  – номер радиотехнического материала;  
 $Q$  – удельное тепловыделение источника;  
 $t$  – время работы электронного прибора;  
 $I$  – ток в проводнике;  
 $R(T_1)$  – сопротивление проводника при температуре  $T_1$ ;  
 $\tau$  – шаг расчета по времени;  
 $R_0$  – сопротивление проводника при температуре  $T_1 = 273$  К;  
 $\gamma$  – удельное сопротивление проводника;  
 $Z$  – характерный размер области решения;  
 $S$  – площадь поперечного сечения проводника;  
 $\beta$  – температурный коэффициент сопротивления проводника;

$t_m$  – максимальное время работы прибора;

$T_e$  – температура окружающей среды;

$\alpha(T_k)$  – коэффициент конвективного теплообмена с внешней средой;

$\varepsilon$  – приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$x_m, y_j$  – шаги сетки по пространственным координатам  $x, y$ ;

$N, M, J$  – число узлов разностных сеток по координатам  $t, x, y$  соответственно;

$d$  – толщина проводника в области окисления;

$h$  – толщина слоя окисла

$\varepsilon_k$  – коэффициент черноты поверхности тела;

$\varepsilon_e$  – коэффициент черноты окружающей среды;

$g$  – номер итерации;

$\delta$  – заданная точность вычислений;

$q$  – знаменатель геометрической прогрессии;

$n$  – номер временного слоя по координате  $t$ ;

$m, j$  номера узлов координатной сетки по координатам  $x, y$  соответственно;

$p_m, q_m$  – вспомогательные коэффициенты;

$r, \varphi$  – пространственные координаты;

$L_r$  – радиус проводника с изоляцией;

$r_m, \varphi_j$  – шаги сетки по пространственным координатам  $r, \varphi$ ;

$U_1$  – тепловыделение прибора за время  $N \cdot \tau$ ;

$U_2$  – тепло отведенное от корпуса прибора через боковую поверхность за время  $N \cdot \tau$ ;

$U_3$  – тепло, накопленное внутри прибора;

$\theta$  – константа скорости химической реакции;

$\theta_0$  – 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;

$M_1, M_3, M_4$  – молярные массы металла, кислорода и оксида соответственно;

$\nu_1, \nu_3, \nu_4$  – стехиометрические коэффициенты;

$d_0$  – начальная толщина металла;

$n_2$  – относительная массовая концентрация кислорода в воздухе;

$\phi$  – коэффициент массообмена;

$Nu_H$  – диффузионный критерий Нуссельта;

$D$  – коэффициент диффузии кислорода в воздухе;

$b$  – ширина зоны дефекта;

$Q_2$  – тепловой эффект реакции окисления.

## Содержание

Введение .....	7
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	13
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В КОРПУСЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА. МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ .....	43
2.1 Моделирование двумерных температурных полей в электронном приборе.....	46
2.1.1 Общая физическая постановка .....	46
2.1.2 Математическая постановка.....	50
2.1.3 Метод решения.....	52
2.2 Моделирование двумерных температурных полей в проводнике круглого поперечного сечения.....	56
2.2.1 Физическая постановка.....	56
2.2.2 Математическая постановка.....	56
2.3 Тестирование математических моделей и методов решения .....	62
2.4 Постановка задачи моделирования процессов окисления металлических проводников .....	65
2.4.1 Физико-химические процессы окисления металлов в РЭА.....	65
2.4.2 Механизмы и кинетика коррозии алюминиевой металлизации в электролите .....	67
2.4.3 Кинетика окисления металла (меди и алюминия) кислородом ...	71
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ И ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ .....	76

3.1 Численная оценка характеристик надежности стабилизатора напряжения в условиях термического окисления токоведущих элементов.....	76
3.2 Влияние окисления медного проводника круглого сечения на параметры, характеризующие надежность электронной схемы .....	90
3.3 Численное моделирование влияния окисления алюминиевой металлизации кислородом на надежность интегральной схемы .....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	115
Список литературы .....	117

## **Введение**

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, неотъемлемой частью которых такие материалы являются, в процессе их функционирования [1-23]. Такие нагрузки являются объективным следствием интеграции процессов переноса электрических зарядов в малых по размерам радиоэлектронных элементах.

В настоящее время модели прогнозирования надежности изделий радиоэлектроники основываются преимущественно на результатах статистического анализа ускоренных испытаний групп изделий [24-26]. Опытные образцы испытывают под действием различных факторов (повышенных температур, напряжения питания и др.), ускоряющих процессы старения в РТМ [25, 26]. Современные [27-32] подходы к оценкам остаточной надежности радиотехнических материалов опираются, в основном, на статистические данные по отказам изделий определенного типа за большие интервалы времени. При этом, как правило, не рассматриваются конкретные физические процессы в РТМ, приводящие к снижению долговечности и надежности радиоэлектронных материалов, например, интегральных микросхем (ИС) или других образцов элементной базы радиоэлектронного оборудования и электронной техники при реальных рабочих температурах в условиях длительной эксплуатации [24-26].

Отказы полупроводниковых приборов (ППП) и ИС из-за коррозии металлизации достаточно часты [24-26, 33-42]. Установлено, что во многих случаях пластмассовые корпуса не защищают материалы ППП от проникновения влаги и воздуха при длительной эксплуатации [33-36]. Типичные полимерные материалы (полиэтилен, стеклотекстолит, эпоксидные смолы), используемые для изготовления корпусов микросхем и изоляции металлических проводников, при длительной работе в условиях

циклических и механических нагрузок часто растрескиваются (особенно при циклическом нагреве и охлаждении) [43-45]. Многие реальные радиотехнические материалы работают в условиях повышенной влажности. Но этот фактор, являющийся неблагоприятным для работы любого образца РЭО и ЭТ, учитывается при проектировании изделий достаточно формально [25] путем ввода эмпирических коэффициентов в показатели надежности.

Интегральные микросхемы постепенно вытесняют схемы на дискретных элементах. Любое радиоэлектронное устройство не обходится в настоящее время без ИС [46]. Основными достоинствами микросхем являются малые габариты, масса, потребляемая мощность, высокая надежность, стабильность выходных характеристик. Несмотря на гарантированную высокую надежность ИС и стабильность выходных характеристик, на поверхности материалов таких схем развиваются физико-химические процессы, под действием которых микросхемы выходят из строя или происходит параметрический отказ [25, 26].

Существующие в настоящее время методики прогнозирования надежности радиоэлектронного оборудования и электронной техники не учитывают процессы окисления металлических РТМ, а также, связанные с этими процессами, изменения характеристик электронных приборов [1-27].

До настоящего времени экспериментальный или теоретический анализ основных закономерностей процессов переноса зарядов в ИС в условиях окисления металлизации не проводился. Также ранее не исследовалась связь процесса окисления с характеристиками интегральных схем.

Анализ состояния теоретических и практических подходов к прогнозированию работоспособности (или надежности) электронных приборов 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 данной работы – разработка нового подхода к прогностическому моделированию характеристик 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 этой цели необходимо решение следующих задач:

- 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 важнейших факторов:
  - пространственного характера распространения тепла;
  - нестационарности процессов теплопереноса;
  - конвективного теплообмена с внешней средой;
  - радиационного теплообмена с внешней средой;
  - наличия локально сосредоточенных источников тепловыделения;
  - влияния температуры на скорость окисления металлизации и диффузии окислителя в оксидном слое.
- 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

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.

#### 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 (температуры этих двух решений) почти не зависели от изменения сеточных параметров (менее 1%).

### Защищаемые положения

1. Новая методика прогностического моделирования параметров надежности изделий электронной техники под влиянием окисления металлических элементов в условиях интенсивного теплообмена 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.

### 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 нефтегазовой 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» 2011 г.

#### Публикации.

Основные результаты диссертации представлены в трудах вышеперечисленных конференций, опубликованы три статьи две из которых в журналах, утвержденных ВАК: «Электромагнитные волны и электронные системы», «Известия Томского политехнического университета», а также получено два авторских свидетельства о регистрации программной разработки в Объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование». Всего по материалам диссертации опубликовано 11 работ, 9 из них в соавторстве с доктором физико-математических наук, профессором Г.В. Кузнецовым и доктором физико-математических наук, профессором Г.Я. Мамонтовым.

# 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В настоящее время остается актуальной проблема обеспечения высокой надежности функционирования радиоэлектронного оборудования и электронной техники. Это связано с тем, что размеры электронных приборов уменьшаются с одновременным увеличением тепловых и электрических нагрузок на радиотехнические материалы и изделия на их основе [26].

Современные методы анализа и прогнозирования надежности электронных приборов опираются на математическое моделирование надежности РЭО и ЭТ как функции от ряда факторов. В качестве важнейших факторов рассматриваются температура  $T$  и напряжение питания [25, 26]. Типичные модели надежности электронных приборов [25] приведены ниже.

Степенная модель:

$$\mu(V) = CV^P, \quad (1.1)$$

где  $C$ ,  $P$  – константы;  $V$  – фактор нагрузки (чаще всего относительная влажность или напряжение питания).

Модель Аррениуса:

$$\mu(T) = C \exp(-E / kT), \quad (1.2)$$

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

Однофакторная модель Эйринга:

$$\mu(T) = CT \exp(-E / kT), \quad (1.3)$$

где константы аналогичны константам модели Аррениуса.

Двухфакторная модель Эйринга:

$$\mu(T) = C \exp(-B / kT) \exp(AV + (DV / kT)), \quad (1.4)$$

где  $C$ ,  $B$ ,  $A$ ,  $D$  – параметры, определяемые из эксперимента;  $T$  – температура;  $V$  – любой другой фактор нагрузки.

Модели (1.1-1.4) применяют на этапе проектирования электронных приборов. Температура является главным фактором, от которого зависит их надежность. Однако прогнозировать надежность приборов, не включая в модели (1.1-1.4) другие важные факторы, например, влажность, питающие напряжения, перепады температур, механизмы старения радиотехнических материалов нельзя. Без учета этих факторов и механизмов показатели надежности приборов могут быть недостоверными.

Для построения функции надежности с большим числом аргументов применяется метод коэффициентов [25]. Интенсивность отказов интегральных микросхем определяется по выражению [25]:

$$\mu = \mu_0 K_{CT} K_{\text{Э}} K_{\text{КОРП}} K_{\text{ПР}} K_V K_{\text{ИС}}, \quad (1.5)$$

где  $\mu_0$  – базовая интенсивность отказов ИС, полученная для определенных режимов и условий эксплуатации;  $K_{CT}$ ;  $K_{\text{Э}}$ ;  $K_{\text{ПР}}$ ;  $K_{\text{КОРП}}$ ;  $K_V$ ;  $K_{\text{ИС}}$  – коэффициенты, учитывающие соответственно: рабочую температуру микросхем; жесткость условий эксплуатации; уровень качества изготовления радиотехнических изделий; тип корпуса ИС; зависимость надежности микросхем от напряжения питания; отработанность технологического процесса изготовления радиотехнических изделий (РТИ).

Модель (1.5) можно использовать для оценки надежности на момент изготовления ИС. Дефекты в микросхеме, накопившиеся в результате протекания процессов старения при продолжительной эксплуатации последней модель (1.5) не учитывает.

Большинство фирм-производителей электронных приборов (Siemens AG, Analog Devices, Atmel, Xilinx и др.) оценивают надежность микросхем по методикам, включающим электротермотренировку электронных приборов [26]. Интенсивность отказов ИС рассчитывается по выражению [26]:

$$\mu = \frac{\chi^2(P, m)}{2N\Delta t K_y} \times 10^9; \quad m = (2n + 2), \quad (1.6)$$

где  $\chi^2$  – экспериментальное распределение безотказной работы прибора;  $P$  – доверительная вероятность (0,5–0,95);  $n$  – количество отказавших

микросхем;  $N$  – общее число испытуемых ИС;  $K_y$  – обобщенный коэффициент ускорения;  $\Delta t$  – время испытаний.

В то же время установлено, что так называемые «ускоренные» лабораторные испытания РЭО приводят к результатам, существенно (в несколько раз) занижающим реальные показатели надежности, например авиационной радиоэлектроники [47]. Такой эффект может быть объяснен тем, что все термохимические процессы, протекающие на поверхности и в объеме РТИ (окисление, термическая деструкция материалов), экспоненциально зависят от температуры. Снижение многократно времени лабораторных испытаний с соответствующим ростом температуры и напряжения питания приводит к существенной интенсификации деструкционных и окислительных процессов в радиотехнических материалах по сравнению с реальными условиями эксплуатации. Соответствующим образом снижаются и показатели надежности при лабораторных испытаниях. Методика прогнозирования надежности РЭО [26] применяется на этапе проектирования и выпуска готовых микросхем и транзисторов. На практике в условиях продолжительной работы радиоэлектронного оборудования выражение (1.6) применять нельзя.

Модель динамики отказов элементов РЭО с учетом особенностей эксплуатации, конструктивного и схемотехнического построения предложена в [48]. Интенсивность отказов определялась с помощью выражения:

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_0, & t \leq b; \\ \mu_0 + \mu_1(t-b), & t > b, \end{cases} \quad (1.7)$$

где  $\mu_0$  – начальный уровень интенсивности отказов аппаратуры;  $t$  – наработка прибора;  $\mu_1$  – темп роста интенсивности отказов;  $b$  – момент времени, при котором начинается рост интенсивности отказов.

Плотность распределения наработки между отказами изделия:

$$f(t) = \exp\left(-\int \mu(t)dt\right) = \begin{cases} \mu_0 \exp(-\mu_0 t), & t \leq b; \\ \mu_0 + \mu_1(t-b) \exp(-(\mu_0 - \mu_1 b)t - \mu_1(t^2 + b^2)/2), & t > b. \end{cases} \quad (1.8)$$

Без статистики отказов конкретного типа РЭО такая модель неэффективна. На практике такая методика может быть использована, если для электронного оборудования предусмотрено техническое обслуживание и ведется статистика отказов приборов. Учитывая сложность аппаратуры, оценка влияния отказа одной электронной схемы на другую в РЭО по вышеприведенной методике является трудновыполнимой задачей.

Зависимость интенсивности отказов электронных приборов от скорости протекания физико-химических процессов с соответствующими весовыми коэффициентами рассматривалась в [49]. В исследуемом изделии [49] одновременно протекали необратимые процессы типа: переноса (диффузии), адсорбции, связанные с увеличением объемов (трещинообразование), гомогенные химические реакции. Комплексно оценка их влияния на интенсивность отказов РЭО при увеличении температуры прибора в течение времени  $t$  проводилась методами теории подобия [50]. Интенсивность отказов  $\mu(T,t)$  оценивалась по выражению [49]:

$$\begin{aligned} \mu(T,t) = & \sum_{i=1}^{Q_1} \mu_{i1} \exp\left\{-\frac{\Delta\varepsilon_{i1}}{R} \cdot \frac{(T_0 - T)}{T_0 T}\right\} + \sum_{i=1}^{Q_2} \mu_{i2} \exp\left\{-\frac{\Delta\varepsilon_{i2}}{R} \cdot \frac{(T_0 - T)}{T_0 T}\right\} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T}} + \\ & + \sum_{i=1}^{Q_3} \mu_{i3} \exp\left\{-\frac{\Delta\varepsilon_{i3}}{R} \cdot \frac{(T_0 - T)}{T_0 T}\right\} t^{\gamma_{i3}-1} + \sum_{i=1}^{Q_4} \mu_{i4} \exp\left\{-\frac{\Delta\varepsilon_{i4}}{R} \cdot \frac{(T_0 - T)}{T_0 T}\right\} \end{aligned} \quad (1.9)$$

где  $T$  – абсолютная температура;  $T_0=273$  К;  $\Delta\varepsilon_{ij}$  – энергия активации;  $R$  – газовая постоянная;  $\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}, \mu_{i4}$  – интенсивности отказов, вызываемых  $i1, i2, i3, i4$  – процессами при  $T = T_0$ ;  $t$  – время;  $Q_q$  – количество процессов  $q$ -го типа;  $\gamma_{i3}$  – величина зависящая от формы зародыша в процессах распада твердых растворов.

Недостатки такой модели заключаются в том, что показатели, характеризующие рассматриваемые физико-химические процессы неизвестны (энергия активации, интенсивности отказов). Кроме того, эти процессы зависят не только от температуры, но и от скорости ее изменения, а также от влияния других факторов (влажности, напряженности

электрического поля, и т.д.) На практике прогнозирования надежности электронных приборов такая модель не используется.

Отечественные и зарубежные методики расчета и прогнозирования безотказности микросхем военной и аэрокосмической электроники сравнивались в [51]. Интенсивность отказов корпуса РТИ согласно справочнику министерства обороны США по надежности аппаратуры MIL-HDBK-217F [51]:

$$\mu_{КОРП} = ((0,0024 + 1,85 \cdot 10^{-5} \cdot N) \times \pi_E \pi_Q \pi_{PT} + \mu_{PH}) \cdot 10^{-6}, \quad (1.10)$$

где  $N$  – число выводов корпуса;  $\pi_E$ ,  $\pi_Q$ ,  $\pi_{PT}$  – эмпирические коэффициенты, отн. ед.;  $\mu_{PH}$  – коэффициент герметичности корпуса.

Интенсивность отказов ИС в негерметичных корпусах представляет собой функцию плотности вероятности логарифмически-нормального распределения [51]:

$$\mu_{PH} = \frac{1}{\sigma_{PH} \sqrt{2\pi t}} \exp \left[ - \frac{\left[ \ln t - \left( \ln t_{50PH} - \frac{\sigma_{PH}^2}{2} \right) \right]^2}{2\sigma_{PH}^2} \right]; \quad t = t_{ЭТТ} / 10^6; \quad M_0 \leq t_{50PH} \leq t, \quad (1.11)$$

$t$  – время;  $t_{ЭТТ}$  – время технологической электротермотренировки;  $t_{50PH}$ ,  $\sigma_{PH}$  – параметры распределения;  $M_0$  – мода.

Математическая модель  $t_{50PH}$  имеет вид [51]:

$$t_{50PH} = R \frac{\exp(-E_A / RT_0)}{\exp(-E_{A1} / RT_A)} \times \exp \left( \frac{1}{100} \frac{T_0}{RH_{EFF}} \right); \quad T_A > T_0, \quad (1.12)$$

где  $R = 8.617 \cdot 10^{-5}$  – константа, эВ/°К;  $E_A$  – энергия активации, эВ;  $T_0 = 298$  °К;  $T_A$  – повышенная температура среды;  $RH_{EFF}$  – повышенная влажность среды.

Повышенная влажность среды рассчитывается по формуле [51]:

$$RH_{EFF} = DC \cdot RH \exp \left[ \frac{-0,45}{8,617 \cdot 10^{-5}} \times \left( \frac{1}{T_J} - \frac{1}{T_A} \right) \right] + (1 - DC) RH; \quad RH = RH_{\%} / 100, \quad (1.13)$$

где  $DC$  – напряжение питания прибора;  $RH$  – влажность среды;  $RH_{\%}$  – относительная влажность, %;  $T_J$  – температура кристалла, °К.

Приведенная выше модель предназначена для расчета надежности ИС. Но физические механизмы отказов ИС в [51] не рассматриваются.

Отсутствие физически обоснованной теории получения выражений (1.10-1.13) и их коэффициентов делает практически невозможным применение методики [51] для оценки надежности ИС. Не описаны в [51] и условия электротермотренировки техпроцесса производства микросхем для расчета их надежности.

Интересную нестандартную модель прогнозирования надежности электронных изделий предложили авторы [52]. Процессы старения и деградации в электронных приборах предлагалось изучать теми же методами, что и кинетику химических реакций. Рассматривая процесс старения РТМ как взаимодействие прибора со средой (воздействующие факторы) можно выразить эту реакцию в виде:



где  $A$ ,  $B$  – реагент и продукт реакции соответственно;  $k$  – константа скорости реакции.

Концентрация реагента  $A$  [52]:

$$X(t) = x_0 \exp(-kt), \quad (1.15)$$

Рассматривая состояние изделий для двух сколь угодно близких моментов времени  $t$  и  $t + \Delta t$  после предельного перехода при  $\Delta t \rightarrow 0$  для вероятности  $Q_x(t)$  того, что в момент времени  $t$  изделие окажется в состоянии  $E_x (x = 0, 1, \dots)$ , в котором  $X(t) = x$ , получают [52]:

$$\frac{dQ_x(t)}{dt} = -\lambda_x Q_x(t) + \lambda_{x-1} Q_{x-1}(t); \quad 0 \leq x < \infty; \quad \lambda_x \geq 0; \quad \lambda_x = kx. \quad (1.16)$$

Коэффициенты  $\lambda_x$  дифференциального уравнения (1.16) являются произвольными функциями состояния  $x$ .

Начальное состояние:

$$Q_{x_0}(0) = 1; \quad x \geq 0; \quad Q_x(0) = 0; \quad x \neq x_0. \quad (1.17)$$

Решая в этих условиях уравнение (1.16) получают [54]:

$$Q_x(t) = C_{x_0}^x \exp(-kxt) [1 - \exp(-kt)]^{x_0 - x}. \quad (1.18)$$

Математическое ожидание случайного процесса  $X(t)$ :

$$M[X(t)] = \sum_{x=0}^{\infty} x Q_x(t) = x_0 \exp(-kt). \quad (1.19)$$

Концентрация  $X(t)$  есть непрерывный в пространстве и во времени Марковский процесс. Вероятностная плотность  $X(t)$  является решением уравнения Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial \rho(x, t / (x_0, t_0))}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 [D(x, t) \rho(x, t / (x_0, t_0))]}{\partial x^2} - \frac{\partial [V(x, t) \rho(x, t / (x_0, t_0))]}{\partial x}; \quad 0 < x < \infty, \quad (1.20)$$

где  $D(x, t)$ ,  $V(x, t)$  – коэффициенты диффузии и сноса. Эти коэффициенты пропорциональны мгновенному значению  $x$  концентрации  $X(t)$  [52]:

$$D(x, t) = \alpha x; \quad V(x, t) = kx; \quad k > 0; \quad \alpha > 0. \quad (1.21)$$

Начальные и граничные условия для (1.20):

$$p(x, 0 / (x_0, t_0) = 0) = \delta(x - x_0); \quad p(0, t / (x_0, t_0) = 0) = p[(\infty, t / (x, t) = 0)] = 0, \quad (1.22)$$

где  $\delta$  — функция Дирака.

Таким образом, решив уравнение (1.20) можно прогнозировать надежность электронных изделий. Недостаток такого подхода заключается в том, что коэффициенты диффузии и сноса трудно определить, хотя они полностью характеризуют изучаемый процесс.

Прогнозировать надежность в полупроводниковых приборах и ИС с позиции междисциплинарных теорий предложили авторы [53]. Рассматривались теории: термодинамики, информации, катастроф, синергетики и нечетких множеств.

При термодинамическом подходе предлагается [53] использовать принцип диссипации энергии на дефектах полупроводниковых структур. На электрическую схему подают импульсы напряжения питания. По реактивным составляющим, соответствующим фронту и спаду импульса напряжения питания, оценивают дефектность схемы. Критерий отбора устанавливают по обучающей выборке.

Надежность электронных изделий с позиции теории информации авторы [53] прогнозируют, сопоставляя индивидуальные параметры

электронного прибора с параметрами партии, как в нормальных условиях, так и при внешних влияющих воздействиях.

В рамках теории катастроф [53] деградиционный процесс электронного изделия, имеющего потенциальные дефекты, предлагают представлять векторным полем в пространстве диагностических параметров. Каждая точка пространства определяет состояние изделия, а вектор в этой точке – направление и скорость деградиционного процесса. Наивысшей надежности в партии соответствуют изделия, все диагностические параметры которых занимают место в центральной области гистограмм и сохраняют свое положение при всех существенных внешних воздействиях и во времени. Потенциально ненадежным признают изделие, не удовлетворяющее хотя бы одному из этих требований.

Синергетический подход [53] предлагают использовать и для интерпретации некоторых процессов в полупроводниковых структурах: образование эвтектики на границе алюминий–золото, электрохимическая коррозия металлизации в ИС при наличии в их корпусах следов влаги и хлористого натрия, формирование зарядовой нестабильности. Диссипативные структуры на начальных стадиях таких деградиционных процессов являются источником низкочастотных шумов типа фликкер-шум, что служит основой для ранней диагностики деградации ИС.

Теория нечетких множеств может по мнению авторов [53] позволить повысить достоверность прогнозирования надежности полупроводниковых приборов. Традиционные статистические и физико-статистические подходы [27] в известной степени исчерпали себя применительно к таким высоконадежным и длительно функционирующим интегральным структурам. Теория нечетких множеств в сочетании с испытаниями на ограниченном отрезке времени является одним из перспективных подходом [53] к прогнозированию их надежности.

Недостатки этих методик заключаются в том, что: отсутствуют математические модели рассматриваемых явлений, по которым можно было

бы определить (рассчитать) надежность электронных приборов; нет анализа физики и химии исследуемых процессов; нет структуры и описания этих методик. Модели типа [53] не используются в настоящее время в теории надежности РЭО, следовательно, пока нет подтверждения их значимости для формирования выводов о надежности изделий радиоэлектроники.

Процесс деградации участков контактной металлизации мощных СВЧ транзисторов изучался в [54]. Электродиффузионный отказ металлизации транзисторов наступал из-за нарушения непрерывности потока атомов в областях макроскопических неоднородностей структуры пленки и градиентов температуры. К таким областям относятся: контакт внутреннего проволочного алюминиевого вывода и пленки металла; контакт тугоплавкого металла и пленки алюминия [54]. Нарушение непрерывности обусловлено тем, что коэффициент самодиффузии  $D$  по границам зерен в поликристаллической пленке алюминия существенно превышает коэффициент самодиффузии для материала, с которым она контактирует. Процесс деградации контактной металлизации характеризовался как последовательное образование и рост пустот в области пленки алюминия, непосредственно примыкающей к границе раздела [54].

Время наработки транзисторов до возникновения отказа определялось по выражению [54]:

$$t_H = \frac{k\delta_p l}{ez^* \rho \delta_j} \left\{ \frac{T(x_1)}{\sum_{m=1}^{n_1} D_m \cos \varphi_m} + \frac{T(x_N)}{\sum_{m=1}^{n_N} D_m \cos \varphi_m} \right\}; D_m = D_0 \sin(\Theta_m / 2) \exp(-E(\Theta_m) / kT), \quad (1.23)$$

где  $N$  – число участков, на которые распространяется повреждение;  $l$  – ширина металлизации;  $\delta_p$  – ширина растравливаемых границ зерен;  $ez^*$  – эффективный заряд иона;  $\rho$  – удельное сопротивление пленки;  $\delta$  – средняя ширина границ зерен;  $k$  – постоянная Больцмана;  $D_m$  – коэффициент диффузии вдоль  $m$ -й границы зерен;  $\varphi_m$  – угол между направлением переноса вещества и  $m$ -й границей зерен;  $\Theta_m$  – угол «разориентации» [54]

между соседними зернами;  $E$  – энергия активации процесса электродиффузии;  $T(x_i)$ ,  $j$ ,  $n_i$  – соответственно температура, плотность тока и число границ зерен в  $i$ -м сечении. Выражение (1.23) представлено в [54] без обоснований и выкладок.

Плотность распределения наработки транзисторов до отказа [56]:

$$f(t_H) = \sum_{i=1}^n f_i(t_H)c_i + c_0 f_0(t_H); \quad \sum_{i=0}^n c_i = 1, \quad (1.24)$$

где  $c_i$  – доля дефектных изделий;  $f_i(t_H)$  – плотность распределения наработки до отказа для определенного типа дефектов;  $f_0(t_H)$ ,  $c_0$  – плотность распределения наработки бездефектных изделий и их доля в общем числе приборов.

Подход [54] предназначен для исследования влияния на показатели надежности транзисторов: плотности тока и температуры; микроструктуры зерен среднего размера, дисперсии среднего размера зерна, взаимной ориентации и геометрических размеров металлизации; неоднородности распределения плотности тока, температуры, а также наличие дефектов металлизации. Однако надежность мощных транзисторов зависит не только от электродиффузии в металлизации, но ряда других процессов (окисление, облучение электромагнитными импульсами). Для повышения точности и достоверности прогнозов по надежности электронных приборов необходимо учитывать их комплексно.

Модель надежности жестких выводов ИС представлена в [55]. Потеря электропроводности является одним из основных видов отказа жестких выводов. Наиболее вероятными деградационными процессами, приводящими к потере электропроводности жесткого вывода, является взаимная диффузия между металлическими слоями и механическое разрушение.

На рис. 1.1 представлена фотография механического разрушения жесткого вывода интегральной микросхемы.

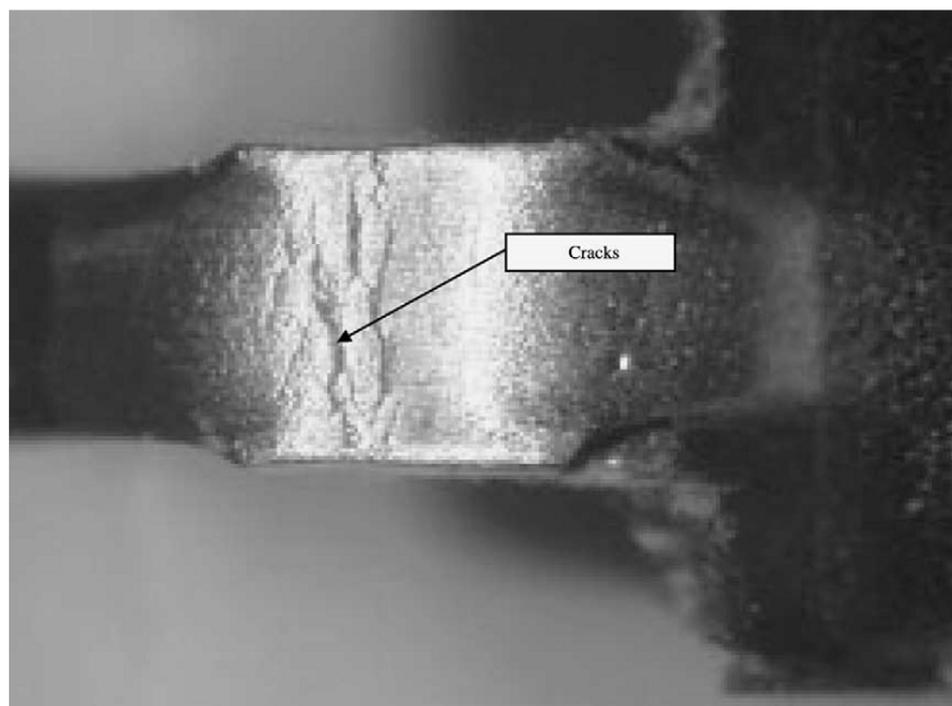


Рисунок 1.1. Механическое разрушение жесткого вывода интегральной микросхемы [40]

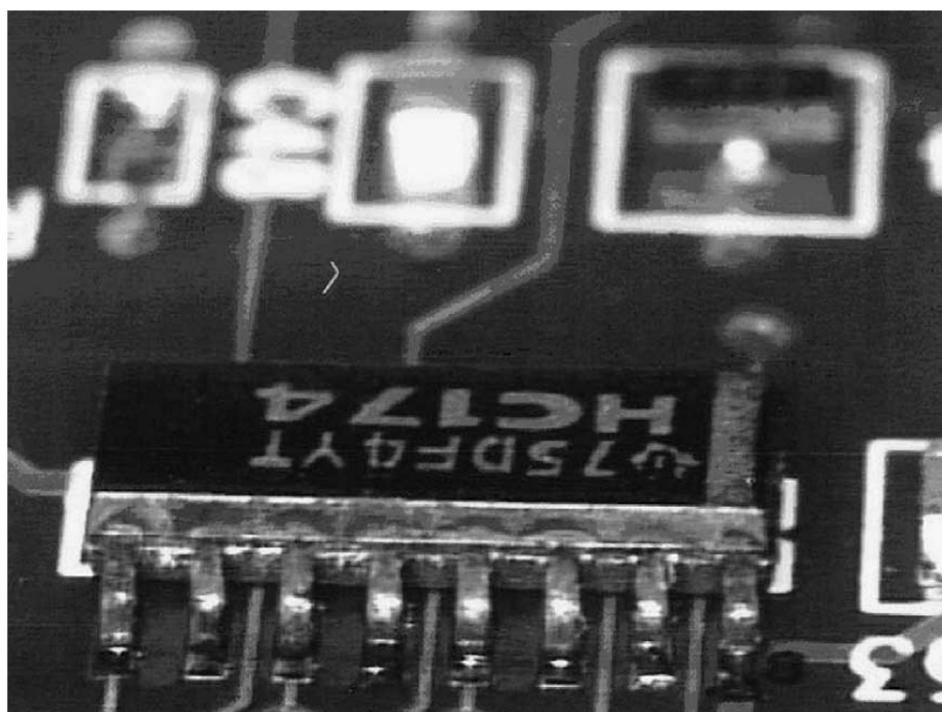


Рисунок 1.2. Образование продуктов коррозии на элементах интегральной микросхемы [40]

Исследование диффузии в двухслойных и многослойных металлических структурах (Al–Cu, V–Cu, V–Al, Al–V–Cu) проводилось оптическим и рентгеноспектральным методами. Было установлено, что диффузия в пленочной системе Cu–Al сопровождается образованием пяти интерметаллических фаз  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuAl}$ ,  $\text{Cu}_4\text{Al}_2$ ,  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  и  $\text{Cu}_3\text{Al}$ , расположенных в диффузионной зоне в указанном порядке. Возможность образования и объем фаз зависят от соотношения толщин пленок меди и алюминия. В случае избытка меди все перечисленные выше фазы наблюдаются в диффузионной зоне. При отжиге объем этих фаз увеличивается до тех пор, пока граница фазы  $\text{CuAl}_2$  не достигнет поверхности алюминия. Затем объем фазы  $\text{CuAl}_2$  начинает уменьшаться вплоть до момента выхода на поверхность алюминия границы следующей фазы  $\text{CuAl}$ . Аналогичный процесс наблюдается и для остальных фаз [55].

Диффузионный процесс авторы [55] описывали константами движения фазовых границ. Диэлектрическая прослойка на алюминии замедляет процесс диффузии меди и алюминия некоторое время, в течение которого разрушается диэлектрик. Для аналитического описания процесса деградации полагалось, что поры радиусом  $r$  статистически равномерно распределены в слое ванадия [55]. Процесс диффузии сводился к рассмотрению распространения диффузионной зоны внутри цилиндра радиусом  $R$  из источника радиусом  $r$ , лежащего в его основании.

Время работы вывода до отказа без диэлектрической прослойки при температуре эксплуатации представляется в виде [55]:

$$t_{\text{отк}} = t_1 + t_2; \quad t_1 = h^2 Al / K_{\text{экс}}; \quad t_2 = (R^2 - r^2) / K_{\text{экс}}; \quad \pi n R^2 = S_B, \quad (1.25)$$

где  $t_1$  – время выхода фазы к границе  $\text{SiO}_2$ ;  $t_2$  – время движения фазы вдоль пленки алюминия до боковой поверхности цилиндра;  $K_{\text{экс}}$  – константа скорости движения границы фазы  $\text{CuAl}$  в объеме алюминия при температуре эксплуатации;  $S_B$  – площадь основания жесткого вывода;  $n$  – число пор;  $h$  – толщина слоя ванадия.

Аналитическая зависимость времени работы до отказа жесткого вывода [55]:

$$t_{омк} = \left\{ l / h_{Al}^2 + S_B / \pi n - r^2 - K_{обр} (t_{обр} - u^2 / D(T)) \right\} / K_{экс}, \quad (1.26)$$

где  $K_{обр}$  – константа скорости движения границы фазы CuAl в объеме алюминия при температуре обработки;  $u$  – пробивное напряжение диэлектрической прослойки;  $D(T)$  – коэффициент взаимной диффузии меди и алюминия, зависящий от температуры.

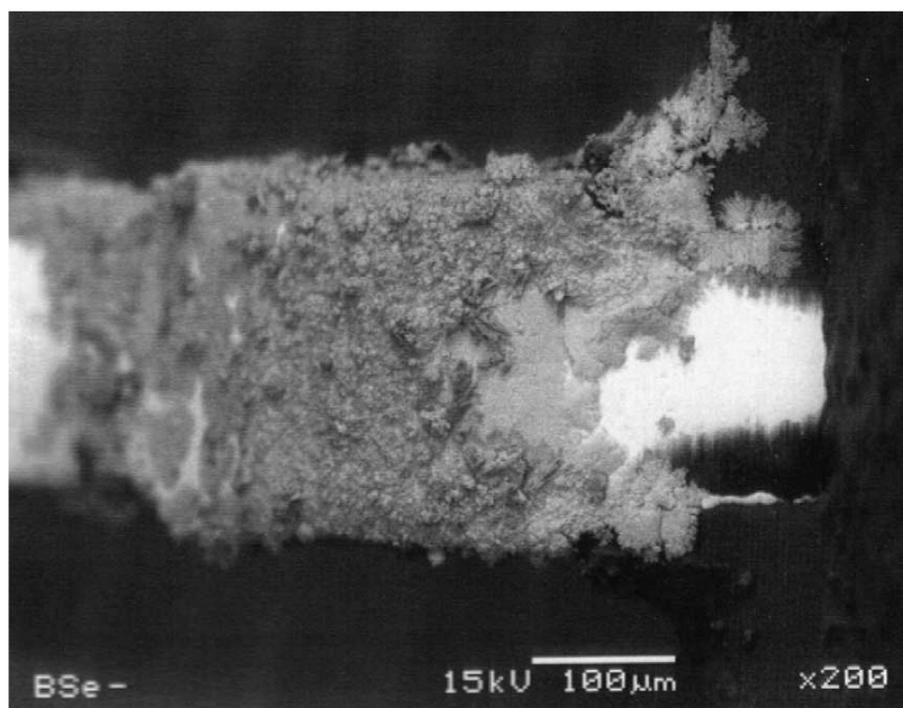
В приведенной выше модели подробно объясняется физический процесс электродиффузии. Однако экспериментально в реальном времени исследовать или оценить степень деградации металла РТИ невозможно из-за трудностей контроля свойств металлизации каждого изделия при его старении.

Значительное число отказов ИС (особенно большой степени интеграции) обусловлено коррозией алюминиевой металлизации [36, 37]. Поэтому еще в 80-х годах прошлого столетия ставились задачи прогноза влияния влаги на надежность электронных приборов [33-35].

На рис. 1.2, 1.3 представлены фотографии образования продуктов коррозии на компонентах РЭА.

Изучением процесса натекания влаги в подкорпусное пространство ИС через микропоры занимались авторы [36]. При герметизации схемы в промышленных условиях давление воздуха равно атмосферному, а влажность близка к нулю. Наличие дефектов (неплотности, щели) при герметизации, приведёт к диффузионному натеканию влаги под корпус, поскольку парциальное давление водяных паров в атмосфере всегда больше нуля. Скорость натекания водяных паров под крышку корпуса, обусловленная разностью парциальных давлений  $\Delta P$  [36]:

$$R = \frac{\pi \bar{v}}{6} \left[ \frac{d^3}{(l + 4/3d)(d/\zeta + 1,51)} \right] \Delta P; \quad \Delta P = |P_A - P_K|, \quad (1.27)$$



а)



б)

Рисунок 1.3. Образование продуктов коррозии на поверхности интегральной микросхемы в различных масштабах а) и б) [40]

где  $\bar{v}$  – средняя скорость молекул газа;  $d$  и  $l$  – диаметр и длина капилляра;  $\zeta$  – длина свободного пробега молекул газа;  $P_A$ ,  $P_K$  – парциальное давление паров воды в атмосфере и под корпусом соответственно.

Изменение относительной влажности под корпусом описывается выражением:

$$\beta_K = \beta_A (1 - \exp\left(\frac{-Rt}{\bar{v}\Delta P}\right)), \quad (1.28)$$

где  $\beta_A$  – относительная влажность воздуха в атмосфере;  $t$  – время процесса.

Изменение давления в капилляре при циклическом изменении температуры [36]:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_A \frac{T_1}{T_2}; \quad P_2 = P_A + (P_1 - P_A) \exp\left(\frac{-\alpha}{\eta T_1}\right); \\ P_3 &= P_2 \frac{T_2}{T_1}; \quad P_4 = P_A + (P_3 - P_A) \exp\left(\frac{-\alpha}{\eta T_2}\right); \quad T_1 < T_2; \quad \tau_X = \tau_T = \tau; \\ \alpha &= \frac{\pi P_A}{128 \bar{v}} \left[ \frac{y d^4}{l + (y/z)d} \right] \tau; \quad y = 1 + 4,4 / (d / \zeta + 1,2); \quad z = 1,7 + 4,7 / (d / \zeta + 2), \end{aligned} \quad (1.29)$$

где  $P_1, P_2; P_3, P_4$  – начальное и конечное давление паров воды в капилляре при  $T_1$  и  $T_2$  соответственно; 1-2, 3-4 – временные интервалы охлаждения и нагревания ИС соответственно;  $T_1$  и  $T_2$  – температура ИС;  $\eta$  – вязкость газовой смеси;  $\tau$  – временной интервал цикла;  $\tau_X$ ,  $\tau_T$  – временные интервалы охлаждения и нагревания ИС.

Относительная влажность подкорпусной атмосферы в каждом термоцикле [36]:

$$\beta_{i+1} = \beta_i \left( 1 - \frac{T_1 (P_{i+3} - P_{i+4})}{T_2 P_{i+2}} \right) + \frac{P_{i+6} - P_{i+5}}{P_A} \beta_A, \quad (1.30)$$

где  $i$  – номер термоцикла.

Масса воды, конденсирующаяся из подкорпусной атмосферы при охлаждении схемы от температуры  $T_2$  до  $T_1$  [36]:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{VA}{R} \left( \frac{\beta(T_2) P_{H_2O}(T_1)}{T_2} - \frac{\beta(T_1) P_{H_2O}(T_2)}{T_1} \right), \quad (1.31)$$

где  $V$  – объем подкорпусного пространства;  $A$  – молекулярный вес воды;  $R$  – газовая постоянная;  $\beta(T_2)$ ,  $\beta(T_1)$  – относительная влажность подкорпусной атмосферы при температуре  $T_2$  и  $T_1$  соответственно;  $P_{H_2O}(T_1)$ ,  $P_{H_2O}(T_2)$  – давление насыщенных паров воды при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно.

Диаметр капли конденсата рассчитывался [36] с помощью выражения:

$$a = \frac{3 \sin^3 \varphi \Delta m}{\pi (1 - \cos \varphi)^2 (2 + \cos \varphi) P_{H_2O}(T)}, \quad (1.32)$$

где  $\varphi$  – угол смачивания.

Описанная выше модель коррозионных отказов ИС [36] имеет ряд недостатков. Во-первых: не рассматривается кинетика окисления металлизации (вид коррозионного процесса, скорость разрушения металла, факторы, влияющие на скорость коррозии). Во-вторых: не анализируется надежность микросхем при формировании пленки влаги в подкорпусном пространстве ИС.

Механизм коррозии алюминиевой металлизации ИС изучался в [37]. Окисление металлизации протекало в условиях конденсации паров воды на поверхности кристалла при наличии внешней катодной поляризации. Изучалась температурная зависимость в диапазоне температур от 25 до 90 °С скорости коррозии алюминия при изменении величины плотности тока в диапазоне  $(0,30 \div 4,0) \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> в водных растворах электролитов, а также в растворе NaOH и при отсутствии внешней поляризации.

Удельная скорость коррозии алюминия на катоде определялась как уменьшение числа атомов металла в единицу времени на единице площади поверхности раздела металл–раствор [37]:

$$\frac{-dN}{dtS} = ai^m \exp(-E/kT), \quad (1.33)$$

где  $N$  – число атомов металла;  $t$  – время реакции;  $m$ ,  $a$  – постоянные;  $E$  – энергия активации процесса коррозии;  $i$  – плотность катодного тока;  $S$  – площадь катода.

Считалось, что отказ ИС наступит, если прокорродирует некоторое критическое количество атомов алюминия на катоде, зависящее от топологических и функциональных особенностей ИС [37]:

$$\Delta N_{\text{крит}} = \Delta V \rho / A, \quad (1.34)$$

где  $\Delta V$  – объем прокорродировавшего Al;  $\rho$  – плотность алюминия;  $A$  – вес грамм-атома алюминия.

Время разрушения металлизации:

$$t_{\text{отк}} = \Delta V \rho / A a (I)^{-m} S^{m-1} \exp(E / kT), \quad I = iS, \quad (1.35)$$

где  $I$  – ток электролиза.

$$I = (\varepsilon - \varepsilon_0) \sigma, \quad \sigma = \sigma_{\text{уд}} h l / d, \quad (1.36)$$

где  $\varepsilon$  – электродвижущая сила (ЭДС) внешнего источника;  $\varepsilon_0$  – ЭДС окисления алюминия;  $\sigma$  – электропроводность цепи;  $\sigma_{\text{уд}}$  – удельная электропроводность электролита;  $h, l$  – толщина и длина дорожки металлизации ИС;  $d$  – расстояние между соседними дорожками металлизации ИС, образующими электролитическую ячейку.

Анализируя модель окисления металлизации ИС [37] можно сделать некоторые выводы. В работе [37] подробно исследована кинетика окисления алюминия в микросхеме. Выражения, характеризующие взаимодействие влаги с металлом, могут быть использованы для численного моделирования этого процесса при изменении значений воздействующих факторов (температура, влажность, плотность тока).

Вероятность теплового поражения полупроводниковых приборов из-за воздействия мощных импульсов СВЧ оценивалась в [56]. Температура нагревания полупроводника функционально зависит от длительности импульса  $T = \varphi(t_u)$ . Знание этой зависимости позволяет определить  $t_u$  как функцию от  $T$ :  $t_u = \psi(T)$ .

Вероятность теплового поражения полупроводникового прибора в общем виде:

$$p_{отк} = \int_{(\Omega)} \int_{T_0}^T f[\psi(T)] \psi'(T) f(x) dT dx, \quad (1.37)$$

где  $(\Omega)$  – область возможного изменения температуры  $T$ ;  $x$  – текущее значение температуры полупроводника;  $f(x)$  – плотность вероятности значения  $x$ .

Закон распределения температур катастрофических отказов полупроводников согласно предельной теореме теории вероятностей близок к нормальному. Поэтому вероятность отказа полупроводников от воздействия импульсов [56]:

$$p_{отк} = \frac{1}{2} \int_{(\Omega)} f[\psi(T)] \psi'(T) dT + \frac{1}{2} \int_{(\Omega)} f[\psi(T)] \psi'(T) \Phi\left(\frac{T - m_p}{\sigma_p \sqrt{2}}\right) dT, \quad (1.38)$$

где  $\Phi(x)$  – табулированный интеграл вероятности;  $m_p$  и  $\sigma_p$  – среднее значение температуры катастрофического отказа полупроводника и ее среднеквадратическое отклонение.

Аналитическая зависимость температуры нагревания полупроводника от длительности воздействующего импульса в диапазоне температур катастрофического отказа для наиболее термостойких кремниевых СВЧ диодов с достаточно точностью может быть аппроксимирована линейной функцией [56]:

$$T = At_u + B, \quad (1.39)$$

где  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты, зависящие от плотности потока импульсной мощности, поступающей на полупроводник, и его параметров.

При нормальном законе распределения температуры катастрофического отказа и линейной зависимости температуры нагревания от длительности мощного импульса (1.38) примет вид:

$$p_{отк} = \frac{1}{2A} \int_{(\Omega)} f\left(\frac{T - B}{A}\right) dT + \frac{1}{2A} \int_{(\Omega)} f\left(\frac{T - B}{A}\right) \Phi\left(\frac{T - m_p}{\sigma_p \sqrt{2}}\right) dT, \quad (1.40)$$

Вероятность  $p_{отк}$  при равномерном, нормальном и двухстороннем экспоненциальном законах распределения  $t_u$  приводятся ниже.

Вероятность отказа полупроводника при равномерном законе распределения  $t_u$  [56]:

$$p_{омк} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4\Delta T} \left[ (m_T - m_p + \Delta T) \Phi \left( \frac{m_T - m_p + \Delta T}{\sigma_p \sqrt{2}} \right) + \frac{\sigma_p \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ - \frac{(m_T - m_p + \Delta T)^2}{2\sigma_p^2} \right] \right] -$$

$$- (m_T - m_p - \Delta T) \Phi \left( \frac{m_T - m_p - \Delta T}{\sigma_p \sqrt{2}} \right) - \frac{\sigma_p \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \exp \left[ - \frac{(m_T - m_p - \Delta T)^2}{2\sigma_p^2} \right] \Big], \quad (1.41)$$

где  $m_T = At_{u0} + B$ ;  $t_{u0}$  – среднее значение  $t_u$ ;  $\Delta T = A\Delta t_u$  – область изменения температуры вследствие изменения длительности импульса  $T \in (m_T - \Delta T, m_T + \Delta T)$ ;  $2\Delta t_u$  – область существования  $t_u$  ( $t_{u0} \pm \Delta t_u$ ).

Вероятность теплового поражения полупроводника прибора при нормальном законе распределения  $t_u$  [56]:

$$p_{омк} = \frac{1}{2} \int_{T_0}^T \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(x - m_T)^2}{2\sigma_T^2} \right] dx + \frac{1}{2} \int_{T_0}^T \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(x - m_T)^2}{2\sigma_T^2} \right] \Phi \left( \frac{x - m_p}{\sigma_p \sqrt{2}} \right) dx;$$

$$\sigma_T = A\sigma_t; \quad \Phi \left( \frac{x - m_p}{\sigma_p \sqrt{2}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x - m_p}{\sigma_p \sqrt{2}}} \exp(-y^2) dy. \quad (1.42)$$

Вероятность теплового поражения полупроводника прибора при распределении  $t_u$  по закону Лапласа [56]:

$$p_{омк} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4;$$

$$I_1 = \frac{1}{2} \int_{T_0}^{m_T} \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2}} \exp \left[ \frac{\sqrt{2}(T - m_T)}{\sigma_T} \right] dT = \frac{1}{4};$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \int_{m_T}^T \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2}} \exp \left[ - \frac{\sqrt{2}(T - m_T)}{\sigma_T} \right] dx \cong \frac{1}{4} \left( 1 - \exp \left[ - \frac{\sqrt{2}(T - m_T)}{\sigma_T} \right] \right) \quad (1.43)$$

при  $m_T \gg T_0$ ,  $m_T \gg \sigma_T$ ;

$$I_3 = \frac{1}{4} \exp \left( - \frac{\sqrt{2}\Delta m}{\sigma_T} \right) \left[ \exp \left( \frac{\sqrt{2}\Delta m}{\sigma_T} \right) \Phi \left( \frac{\Delta m}{\sigma_T \sqrt{2}} \right) - \exp(h^2) \Phi \left( \frac{\Delta m}{\sigma_T \sqrt{2}} - h \right) + \right.$$

$$\left. \exp \left( - \frac{\sqrt{2}m_p}{\sigma_T} \right) - \exp(h^2) \right]; \quad \Delta m = m_T - m_p; \quad h = \frac{\sigma_p}{\sigma_T};$$

$$I_4 = \frac{1}{4} \exp(b\Delta m) \{ -\exp[-b(T - m_p)] \Phi[a(T - m_p)] + \exp(h^2) \Phi[a(T - m_p) + h] + \exp(-b\Delta m) \Phi(a\Delta m) - \exp(h^2) \Phi(a\Delta m + h) \}; \quad a = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2}}; \quad b = \frac{\sqrt{2}}{\sigma_T}.$$

Для вычисления вероятности отказа полупроводниковых приборов по моделям (1.41–1.43) необходимо знать законы распределения случайных величин (температуры отказа и длительности мощного импульса). Оценить температуру, при которой откажет транзистор под воздействием мощного СВЧ импульса определенной длительности, можно путем численного моделирования этих процессов. Однако методик численного анализа выхода из строя ППП при излучении СВЧ импульсов пока нет.

Коррозия внутрисхемной разводки ИС, по мнению авторов [38] может протекать из-за наличия загрязнений, внесенных в процессе изготовления микросхем. Пассивирующие диэлектрические пленки, которые наносятся на поверхность кристаллов, в значительной мере предохраняют металлизацию ИС от коррозии. Однако в местах дефектов диэлектрической пленки (сквозные поры, трещины) внутрисхемная алюминиевая разводка подвержена окислению в присутствии химически активных веществ и влаги на поверхности кристалла [38].

Локальный рентгено-спектральный микроанализ участков алюминиевой разводки ИС, на которых произошла коррозия, показал [38], что в продуктах коррозии металлизации присутствуют такие химически активные вещества, как хлор, калий, кальций. Для того чтобы определить, на каком этапе производства ИС попадают химически активные вещества, проводились форсированные испытания. Методика форсированных испытаний сводилась к следующему. Испытывались кристаллы ИС в составе пластин, ИС с различных операций сборки и ИС после разгерметизации корпусов. Объекты испытания подвергались ускоренному старению в парах кипящей деионизованной воды при температуре  $75 \pm 5^\circ \text{C}$  и относительной влажности  $\sim 98\%$  в течение 5 часов [38].

Визуальный контроль состояния металлизации ИС показал [38] наличие части образцов с локальной коррозией металлизации. В партии ИС, для изготовления которой использовалась неочищенная золотая проволока, наблюдалась сплошная коррозия металлизации контактных площадок и локальная коррозия пассивированной металлизации. Установлено, что попадание на кристаллы ИС загрязнений, вызывающих коррозию металлизации, происходит в процессе сборки и герметизации ИС. Загрязнения попадают из-за низкой чистоты исходных материалов и комплектующих изделий (золотой проволоки, деталей корпусов). Степень очистки золотой проволоки, используемой для изготовления гибких выводов ИС, оказывает существенное влияние на коррозионную стойкость металлизации [38].

Анализируя методику коррозионных процессов в ИС можно сделать вывод, что причиной выхода из строя микросхем может быть внесенные загрязнения при сборке ИС. Методик прогнозирования надежности ИС при взаимодействии металлизации с загрязнениями в настоящее время нет. Также в модели [38] не приводятся кинетические уравнения окисления металлов с реагентами.

Изменения характеристик микросхем в результате деградации элементов металл-оксид-полупроводник (МОП) рассматривалась в [57]. Исследовалась МОП структура, в приповерхностном слое которой содержалась неконтролируемая примесь в виде ионов или нейтральных комплексов. Было установлено, что деградация элементов МОП связана с изменением индуцированного в полупроводник заряда  $\Delta Q_{sc}$ . Изменение заряда в рассматриваемой области окисла зависит главным образом от скорости изменения концентрации диссоциированной примеси. Диссоциация нейтральной примеси приводит к генерации дополнительных ионов в  $\text{SiO}_2$ . В [57] приведена модель миграционной поляризации структур МОП для расчета показателей их надежности. Предложена система уравнений, описывающих зарядовые процессы в  $\text{SiO}_2$ , обусловленные диссоциацией

примесей и миграцией ионов. Получено аналитическое решение для случая высокого уровня возмущения внешним полем с полярностью, соответствующей положительному потенциалу на металлическом электроде. Экспериментально подтверждены основные закономерности полученного решения.

В [57] оценен масштаб деградации характеристик ИС. Однако исследование влияния изменений этих характеристик на режимы работы и функциональность ИС не приводилось, хотя прогноз надежности ИС и развитие дефектов в структуре является первостепенной задачей.

Причины и механизмы отказов контактов типа металл-кремний и межсоединений на ступеньках окисла изучались в [58]. Отказы реальных приборов, обусловленные конструктивными и технологическими факторами, предлагалось исследовать с помощью испытания тестовых структур. Эти структуры позволяют воспроизводить однородные элементы в широком диапазоне конструктивных решений и технологических режимов получения элементов, а также стимулировать различные виды отказов. Тестовые структуры для исследования контактов представляли собой кристалл кремния, в котором сформирован диффузионный резистор [58]. В слое  $\text{SiO}_2$ , покрывающем область диффузионного резистора, создавались два контактных окна, через которые обеспечивалось контактирование тонкопленочных межсоединений с областью диффузионного резистора. В месте контакта его с металлом формировались диффузионные зонды, с помощью которых можно было снимать распределение напряжения в контакте при протекании тока по цепи: тонкопленочное межсоединение – контакт металл-кремний – диффузионный резистор – контакт кремний-металл – тонкопленочное межсоединение. Критерием отказа принимался разрыв электрической цепи. В ходе эксперимента исследовалось влияние плотности тока, геометрии контактов, способа пропускания тока через контакт на время наработки до отказа [58].

Установлено [58], что отказы контактов типа металл-полупроводник происходят в результате диффузии ионов контактирующих материалов. Вызвано это различием в коэффициентах диффузии и энергиях активации электромиграции разнородных материалов. На положительных контактах диффузионных резисторов под действием протекающего тока ионы кремния проникают в пленку алюминия и диффундируют далее в ней по границам зерен металла. На отрицательных – силы «электронного ветра» [58] заставляют ионы алюминия диффундировать в кремний. Но так как диффузия ионов кремния в пленку алюминия проходит значительно легче, чем диффузия ионов алюминия в кремний, то на отрицательных контактах будет происходить накапливание массы алюминия, а на положительных – образование пустот в кремниевых резисторах. В результате этих процессов на отрицательных контактах диффузионных резисторов наблюдается образование бугорков или рост «усов» в контактирующей с кремнием пленке алюминия, а на положительных – закорачивание нижележащего p-n перехода или разрывы в пленке алюминия, вызванные заполнением алюминием образованных в кремнии пор [58]. Кроме этого, образование избыточного количества кремния на границах зерен алюминия приводит к уменьшению когезии и шелушению пленок алюминия. Неравномерность протекающего по ширине контакта тока приводит к тому, что на ранних стадиях его работы диффузия кремния в пленку алюминия происходит в большей мере у края контактного окна, где течет наибольший ток. Повышению скорости процесса способствуют механические напряжения в кремнии у края контактного окна, вызванные различием в коэффициентах линейного расширения кремния,  $\text{SiO}_2$  и пленки металла.

Но изучая описанные явления, авторы [58] не сформулировали математическую модель для прогноза изменения характеристик электронных приборов в результате протекания этих процессов.

Накопление ЭДС на поверхности полупроводниковой структуры исследовалось в [59]. Изучалась закономерность формирования величины

ЭДС различных планарных структур в зависимости от физических особенностей элементов и состава электролита. Установлено, что число отказов вследствие коррозии, вызванной наличием конденсированной воды, на несколько порядков больше, чем при адсорбции воды на поверхности полупроводниковой структуры. При конденсации влаги на поверхности структуры появляется проводящая пленка электролита и возникает движение ионов, обусловленное различием электрохимических свойств материалов, входящих в состав полупроводниковой структуры. Между отдельными элементами структуры возникает разность потенциалов при отсутствии внешнего электрического напряжения – ЭДС. Зависимость величины ЭДС от физических особенностей структуры и состава электролита использовалась для выявления влаги на поверхности полупроводниковой структуры [59].

Для выяснения основных закономерностей формирования величины ЭДС, ее зависимости от уровней легирования и типа проводимости диффузионных областей планарной полупроводниковой структуры, наличия р-п переходов, а также толстых и тонких слоев двуокиси кремния, проводилось измерение ЭДС между элементами конструкции биполярных планарных транзисторов КТ203, КТ306, КТ312, КТ343, р-канальных металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) транзисторов КП301 а также на интегральных схемах К122УН1. При моделировании попадания влаги на поверхность полупроводниковой структуры использовалась дважды дистиллированная вода. Величина ЭДС измерялась между электродами полностью собранных, но не загерметизированных приборов, помещенных в темную экранированную камеру [59]. Измерение величины ЭДС проводилось с помощью электрометрического вольтметра при входном сопротивлении не менее  $10^8$  Ом. Абсолютная величина ЭДС между элементами полупроводниковых приборов изменялась в пределах от 0 до 320 мВ, а максимальная фиксировалась между выводами, осуществляющими электрический контакт с областями полупроводниковой структуры, разделенными р-п переходом или большим омическим сопротивлением, а

также в электрохимической ячейке, электродами которой служат кремниевая планарная структура и позолоченная траверса корпуса. Установленная зависимость величины ЭДС от физических особенностей элементов полупроводниковой структуры обусловлена тем, что на поверхности различных областей структуры в среде электролита создаются неодинаковые условия для перехода электрона в электролит и обратно. Большой разброс значений величины ЭДС вызван ее сильной зависимостью от состояния поверхности структуры. Величина ЭДС зависит не только от характеристик полупроводниковой структуры, но и от термодинамики и кинетики электрохимических процессов на ее поверхности [59].

Основной характеристикой электролита, определяющей термодинамику и кинетику электрохимических процессов, является величина рН. Кислотно-щелочной баланс конденсата на поверхности полупроводниковой структуры в пластмассовом корпусе варьируется в пределах  $4 \leq \text{pH} \leq 9$ . Это обусловлено растворением ионизируемых примесей в процессе диффузии воды сквозь пластмассу корпуса, а также присутствием ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , адсорбированных или растворенных в двуокиси кремния на поверхности планарной структуры. Установлена [59] зависимость ЭДС от кислотно-щелочного равновесия на эмиттерном переходе маломощного эпитаксиально-планарного кремниевого п-р-п-транзистора КТ342 со структурой, не защищенной полимерным покрытием. В качестве электролитов использовались стандартные титрованные растворы [59]. После нанесения электролита на поверхность полупроводниковой структуры испытуемый прибор помещался в темную экранированную камеру, где и проводилось измерение ЭДС. В отсутствие коррозии изолированного электрода его электродный потенциал определяется, в основном, реакциями водородной и кислородной деполяризации [59]. Более сильная по сравнению с расчетной экспериментальная зависимость ЭДС от рН обусловлена различием стандартных электродных потенциалов р- и п- областей кремния, а также изменением приповерхностного изгиба зон при изменении рН

электролита. Отличительной особенностью экспериментальной зависимости ЭДС от рН является ее неравновесный характер, обусловленный протеканием ионного тока по поверхности полупроводниковой структуры.

Результаты [59] могут быть использованы при численном моделировании процессов окисления металлов под воздействием влаги, однако в [59] нет математической модели формирования ЭДС на поверхности полупроводниковой структуры.

Условия возникновения сбоев и отказов интегральных микросхем при воздействии последовательности импульсов ионизирующего излучения изучались в [60]. Предложена методика, основанная на асимптотической модели пересчета уровней сбоев от воздействия прямоугольного импульса к воздействию последовательности радиационных импульсов. Уровень стойкости при воздействии короткого импульса определялся суммарной дозой за импульс, а в стационарном приближении зависел от максимального значения мощности дозы ионизирующего излучения. Было установлено, что уровень стойкости пропорционален величине суммарной дозы за импульс при его длительности меньшей постоянной времени ионизационной реакции, а при большой длительности максимальной величине мощности дозы ионизирующего излучения. Также в работе оценивали эффективную длительность импульса в линейном приближении с возможностью распространения результатов на более общие случаи формирования ионизационной реакции [60].

Проведенный анализ для последовательности импульсов ионизирующего излучения [60], позволил сделать выводы: при равенстве длительности первого импульса времени задержки второго, а также равенстве мощностей двух импульсов – эффективная длительность равна суммарной длительности двух импульсов; при равенстве времени задержки второго импульса и постоянной времени ионизационной реакции – эффективная длительность равна импульсу, который имеет наименьший коэффициент запаса по стойкости; при относительно короткой

последовательности импульсов – уровень стойкости определяется суммарной дозой.

Результаты [60] свидетельствуют о корректности предложенного подхода для оценки уровней сбоя и отказов в случае применения линейных моделей. Результаты моделирования показали, что применение простой асимптотической модели позволяет прогнозировать уровни сбоя и отказов при воздействии импульсов ионизирующего излучения любой последовательности или произвольной формы. Точность проведенных расчетных оценок для наиболее типовых случаев возникновения сбоя и отказов составляет [60] не менее 50%, что для многих практических случаев является приемлемой величиной. Но прогностической модели «деградации» [60] характеристик ИС при воздействии импульсов ионизирующего излучения пока нет.

Контроль стабильности алюминиевой металлизации в условиях электромиграции был исследован в [61]. С помощью резистометрических измерений и расчета гамма-процентного срока долговечности двух типов алюминиевой металлизации, применяемых в интегральных схемах серии 1554ТБМ и 1594Т авторы [61] прогнозировали явление электромиграции. В качестве испытуемых образцов использовали тестовые структуры, собранные в 14-выводном металлокерамическом корпусе. Тестовые структуры представляли собой наборные полоски металлизации общей длиной 450 мкм на рельефе максимальной сложности. Испытания проводились для двух типов металлизации [61]: площадь сечения типов составляла соответственно  $(0,55 \times 4,1)$  и  $(1,2 \times 4,2)$  мкм. Для проведения испытаний было сформировано 4 выборки приборов (2 металлизации на двух температурных режимах) по 20 шт. в каждой. Перед проведением испытаний приборы проверялись на отсутствие обрывов в металлизации путем измерения сопротивления между выводами приборов. Ускоряющими факторами испытаний являлись: температура окружающей среды  $T_1=100^\circ\text{C}$ ,  $T_2=250^\circ\text{C}$  и ток  $I_1=20\text{ мА}$ ,  $I_2=40\text{ мА}$ . Отказы фиксировались путем контроля тока через цепочки (есть/нет).

Критерием отказа служил полный обрыв или повышенное сопротивление (в сотни раз превышающее начальное сопротивление образца). В процессе испытания фиксировалось время наработки на отказ  $t_F$  тестовых структур. Испытания проводились до наступления 75% отказов. Качество и надежность токопроводящих дорожек оценивалось параметрами логарифмически нормального распределения  $\mu$  и  $\sigma$ , в предположении, что вероятность появления отказов подчиняется такому распределению [61]. Построение полей корреляции «сопротивление–наработка» показало, что не существует корреляции между величиной сопротивления металлизации до испытания и времени наработки до отказа при температуре испытаний 200 и 250 °С.

Методика прогнозирования электромиграции металлизации ИС [61] имеет недостатки. Для оценки и проверки проводимости внутренних проводников микросхемы приходится ее разбирать, припаивать проводники, подключать электронные измерительные приборы. Такие операции без специального оборудования выполнить невозможно, так как размеры проводников составляют порядка 1 мкм и меньше, и постоянно уменьшаются, а число элементов в микросхемах увеличивается. Численные исследования по процессам электромиграции в проводниках электронных приборов до настоящего времени не проводились.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Физическая теория работоспособности радиотехнических материалов и надежности радиоэлектронного оборудования к настоящему времени еще не развита. Большинство моделей надежности электронных приборов опираются на статистический анализ ускоренных испытаний образцов электронной техники [25-32]. Некоторые работы направлены на изучение процессов деградации в радиотехнических изделиях, но

эти модели не привязаны к показателям надежности электронных приборов [38, 57-61].

2. Экспериментально в реальном времени исследовать или даже оценить степень деградации электронных изделий невозможно из-за трудностей контроля условий работы каждого изделия при его старении.
3. Проведены оценки по влиянию процессов старения полимерных элементов РТИ на характеристики надежности радиоэлектронного оборудования с использованием традиционных моделей  $\mu = \mu(T)$ , но с учетом реальных температурных (пространственных) полей [6].
4. Доминирующей причиной отказов интегральных микросхем является окисление металлизации [26, 33-42]. Математические модели взаимодействия проводников электронных приборов с влагой, водяным паром и воздухом, а также другими газообразными или жидкими окислителями, проникающими в структуру при изготовлении полупроводниковых приборов, в настоящее время отсутствуют.
5. Исследования изменений выходных параметров и характеристик электронных приборов при протекании процессов окисления металлизации, деструкции защитных полимерных материалов в условиях реальных температурных полей также пока не проводилось. Методик прогнозирования характеристик надежности электронных приборов, которые объективно учитывали бы эти процессы, в настоящее время нет.
6. При расчете надежности радиотехнических изделий учитывают в основном среднюю по элементу температуру. Хотя известно, что оценка надежности РТИ по средней температуре приводит к завышенным результатам времени наработки изделий до отказа [3]. Значение температуры, скорость ее изменения, перепады температуры между отдельными участками одного радиотехнических изделий являются основными факторами, влияющими на надежность радиоэлектронного оборудования и электронной техники [1-26].

7. Не опубликованы результаты исследований, иллюстрирующие характер и масштабы влияния процесса окисления металлических радиотехнических материалов на работоспособность полупроводниковых приборов или радиоэлектронного оборудования в целом.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В КОРПУСЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА. МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Выполненный в первой главе анализ показал, что при любом подходе к анализу работоспособности радиотехнических материалов и изделий (статистическом, физическом, формальном) температура является важнейшим фактором, определяющим все деградационные процессы в РТМ и на их поверхности. При этом зависимость любых параметров надежности от температуры является экспоненциальной. Соответственно, без детального описания температурного поля с высокой точностью невозможно оценить работоспособность радиотехнических материалов и следовательно надежность радиотехнических изделий.

Пригодность любого радиоэлектронного изделия к использованию по назначению определяется качеством изделия, которое оценивается совокупностью свойств, присущих изделию. Одним из таких свойств является надежность [62].

Надежность относится к числу свойств, которые проявляются при использовании изделий по назначению в течении некоторого времени. Количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта называется показателем надежности. Наборы показателей, описывающих надежность объекта, отличаются, в зависимости от того, является ли объект обслуживаемым, восстанавливаемым, ремонтируемым или нет.

Показателем, наиболее полно характеризующим надежность неремонтируемых изделий, является интенсивность отказов.

Интенсивность отказов  $\mu(t)$  – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Сотрудники Российского центрального научного исследовательского института министерства обороны (22 ЦНИИ МО) опубликовали статью, в которой приводится объективная информация о надежности зарубежной элементной базы и методах прогнозирования надежности радиоэлектронной аппаратуры [25].

Математическое моделирование интенсивности отказов ЭРИ как функции от ряда факторов предлагается определять при помощи модели:

$$\mu_s = \mu_0 \prod K_i,$$

где  $\mu_0$  – базовая интенсивность отказов, т. е. интенсивность отказов, рассчитанная или эмпирически полученная для определенных режимов и условий эксплуатации;  $K_i$  – коэффициент, учитывающий влияние  $i$ -го фактора.

Наиболее простой вариант такой модели основывается на известном уравнении Аррениуса и учитывает только влияние рабочей температуры. В этой модели используется параметр "энергия активации"  $E_a$ , определяемый эмпирически в зависимости от доминирующего вида дефектов в ЭРИ. Усреднено энергия активации принимается для кремниевых полупроводниковых приборов и ИС  $E_a = 0,7 \text{ эВ}$ . Такая модель используется абсолютным большинством зарубежных фирм производителей ЭРИ [25]:

$$\mu(T) = C e^{-E/kT}, \quad (2.1)$$

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

Следует отметить, что вышеприведенное (аппроксимационное по существу) выражение для  $\mu$  было введено в рассмотрение С. Аррениусом для полуэмпирического описания зависимостей скоростей химических реакций от температуры. При этом предэкспоненциальный множитель и энергия активации являлись при введении такой аппроксимации эмпирическими параметрами, определяемыми в специальных экспериментах

с обязательной регистрацией зависимости скорости химической реакции от температуры.

Использование такого экспоненциального выражения для описания зависимости одной из основных характеристик надежности элементной базы РЭА и ЭТ [25] – интенсивности отказов является косвенным признаком химической природы зависимости надежности электронной техники радиоэлектронной аппаратуры от температуры.

Объем представленной в [25] 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 [25]. Поэтому в дальнейшем функциональная зависимость  $\mu(T)$  [25] и использовалась при выполнении настоящего диссертационного исследования в качестве основной функциональной связи между интенсивностью отказов и температурой конкретного электрорадиоэлемента.

Также следует отметить, что все выше изложенное иллюстрирует и значение основного фактора, характеризующего надежность РЭА и ЭТ – температуры. При этом необходимо учитывать, что в реальных условиях работы электронной техники и радиоэлектронной аппаратуры возникают, как показано авторами [2-6], достаточно высокие градиенты температуры в малой окрестности зоны интенсивного тепловыделения (рассеивание энергии). Соответственно при анализе показателей надежности  $\mu(T)$  нельзя использовать математические модели, не учитывающие пространственную неоднородность температурных полей в ППП или ИС обусловленную разрывами коэффициентов теплопроводности на границах между элементами изготовленными из различных материалов (например, «металл–полупроводник» или «металл–диэлектрик»). По этим причинам ниже будет

рассматриваться двумерная (плоская) модель теплопроводности в основных объектах моделирования.

Использование пространственных (трехмерных) моделей теплопереноса в ИС или ЭРИ может привести к повышению точности прогностического моделирования температурных полей и соответственно, значений  $\mu$ . Но этот аспект уже достаточно подробно рассматривался авторами [2-5], поэтому в настоящей диссертации он специально не анализировался.

Для обоснованных выводов о масштабах влияния процессов окисления металлизации ИС по мнению автора диссертации достаточно плоской постановки. Учет пространственного характера теплопереноса может привести только к усилению возможных выводов.

## **2.1 Моделирование двумерных температурных полей в электронном приборе**

### **2.1.1 Общая физическая постановка**

Любой электронный прибор (микросхема, транзистор и т. п.) можно представить в виде конструкции из различных радиотехнических материалов (металл, полупроводник, полимерный материал и т.д.). При постановке задачи часть электронного прибора с дефектом защитного пластикового корпуса представлялась в виде металлической пластины, покрытой слоем полимера с микротрещиной. Такая модель соответствует типичному реальному электронному прибору, т. к. в каждом приборе обязательно есть металлические и изоляционные элементы.

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. 2.1). Проводник нагревался из-за движения электрических зарядов.

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. 2.2).

При постановке задачи приняты следующие допущения.

1. Температуры, при которых проводились исследования, составляли от 253 до 383 К. Такой выбор объясняется тем, что реальные электронные приборы работают в диапазоне соответствующих температур от  $-50$  до  $+50$  °С.

При температурах внешней среды ниже  $-50$  °С или выше  $+50$  °С радиоэлектронная и электронная техника проектируется для работы совместно с системами обеспечения теплового режима (СОТР), которые достаточно часто играют важнейшую роль в обеспечении надежности электрорадиоизделий. Так, например, для обеспечения регламентных режимов работы радиоэлектронной и электронной техники космических аппаратов типа спутников связи, теле-радиовещания и др. разрабатываются специальные СОТР на базе тепловых труб. Такие системы обеспечивают перебор теплоты от энерговыделяющих приборов к системам, работающим в условиях низкотемпературных воздействий или на панели-радиаторы для отвода энергии во внешнюю среду. По этим причинам высокие или низкие температуры при постановке задач не рассматривались. Также считалось, что в этом диапазоне изменения  $T$  теплофизические характеристики не зависят от температуры.

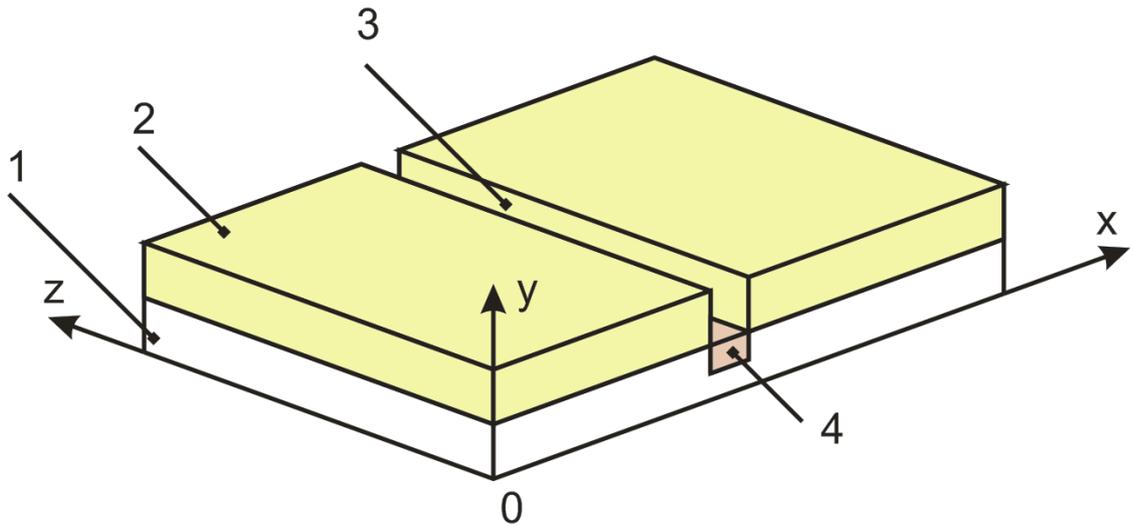


Рисунок 2.1. Металлический проводник, покрытый изоляцией: 1 – металл; 2 – изоляция; 3 – микротрещина; 4 – слой окисла

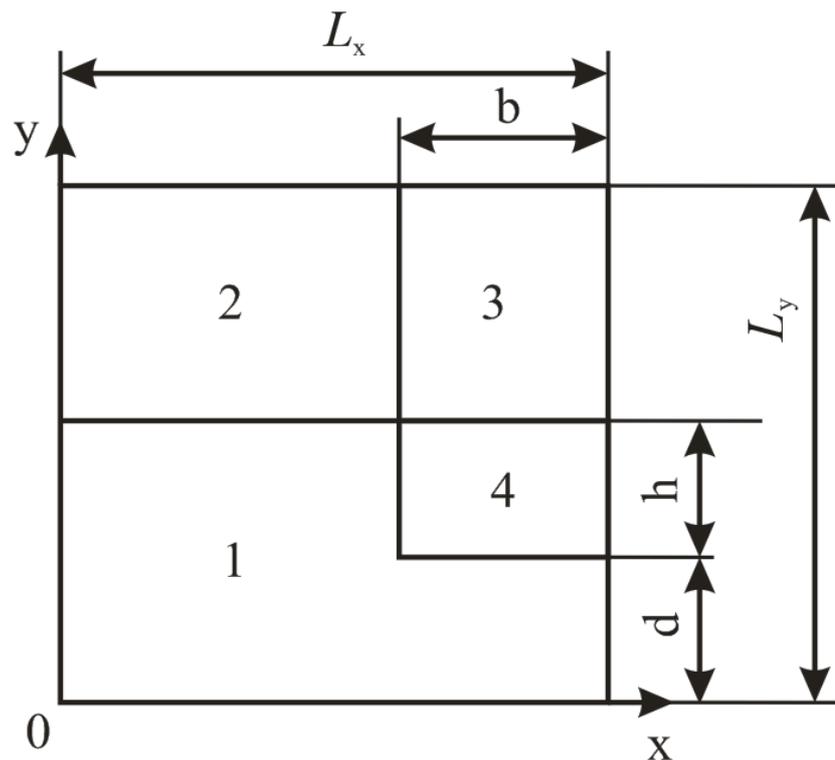


Рисунок 2.2. Область решения задачи окисления в условиях интенсивного теплопереноса для металлического проводника с дефектом изоляции: 1 – металл; 2 – изоляция; 3 – воздух; 4 – пленка окисла

2. Радиотехнические материалы считались изотропными. Это допущение обосновано, т.к. для большинства материалов (алюминий, медь, кремний, пластмассы) типична изотропия.
3. На границах между зонами принимался идеальный тепловой контакт. Для конструктивных элементов ППП это обоснованное приближение, благодаря современной технологии производства полупроводниковых приборов.

Принятая при постановке задачи геометрия области решения учитывает все основные значимые факторы, определяющие работоспособность изделия РЭА и ЭТ (неоднородность свойств отдельных элементов или соответствующих подобластей, наличие трещины и слоя окисла на поверхности металла, возможность массообмена с внешней окисляющей средой). В реальных условиях работы микросхем трещин может быть больше они могут распространяться в разных направлениях, пересекаться, расширяться по мере развития процесса деструкции полимера и т.п. Но все перечисленные процессы могут приводить только к интенсификации реакций окисления металлизации микросхем и усилению негативных тенденций в изменении характеристики  $\mu$ . Поэтому в диссертации рассматривалась несколько упрощенная по сравнению с практикой схема области. Но полученные при этом результаты могут рассматриваться как соответствующие наименее негативным последствиям в изменении  $\mu$ .

Порядок диссертационного исследования был следующим:

Проводились численные исследования процесса окисления в металле радиоэлектронного компонента, совместно с моделированием процессов теплопереноса в области решения. Полученные температурные зависимости электронного прибора во времени использовались для прогнозирования надежности РЭА по модели Аррениуса (2.1).

### 2.1.2 Математическая постановка

В такой физической постановке задача сводилась к решению следующих уравнений:

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

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_4}\right);$$
(2.2)

$$C_k \cdot \rho_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \cdot \left( \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} \right) + Q, \text{ при } k = 1;$$
(2.3)

$$C_k \cdot \rho_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \cdot \left( \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_k}{\partial y^2} \right), \text{ при } k = 2, \dots, 4;$$
(2.4)

Интенсивность удельного тепловыделения в проводнике рассчитывалась следующим образом [63]:

$$Q = \frac{I^2 \cdot R(T_1) \cdot \tau}{S \cdot L_x} + Q_2; \quad R(T_1) = R_0 [1 + \beta(T_1 - 273,15)]; \quad R_0 = \frac{\gamma \cdot L_x}{S};$$

$$S = z \cdot L_y.$$
(2.5)

Область решения ограничивалась следующими временными и геометрическими условиями:

$$t \in [0; t_m], \quad x \in [0; L_x], \quad y \in [0; L_y].$$
(2.6)

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

$$T_k = T_e, \quad h = h_0 \text{ при } t = 0.$$
(2.7)

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

$$x = 0; \quad y \in [0; d + h]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0;$$
(2.8)

$$x = 0; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0;$$
(2.9)

$$x = [L_x - b]; \quad y \in [d; d + h]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \quad T_1 = T_4; \quad (2.10)$$

$$x = [L_x - b]; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \quad T_2 = T_3; \quad (2.11)$$

$$x = L_x; \quad y \in [0; d]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0; \quad (2.12)$$

$$x = L_x; \quad y \in [d; d + h]; \quad \frac{\partial T_4}{\partial x} = 0; \quad (2.13)$$

$$x = L_x; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \frac{\partial T_3}{\partial x} = 0; \quad (2.14)$$

$$y = 0; \quad x \in [0; L_x]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial y} = 0; \quad (2.15)$$

$$y = d; \quad x \in [L_x - b; L_x]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}; \quad T_1 = T_4; \quad (2.16)$$

$$y = d + h; \quad x \in [0; L_x - b]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \quad T_1 = T_2; \quad (2.17)$$

$$y = d + h; \quad x \in [L_x - b; L_x]; \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}; \quad T_3 = T_4; \quad (2.18)$$

$$y = L_y; \quad x \in [0; L_x - b]; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \alpha(T_2)(T_e - T_2) + \varepsilon\sigma(T_e^4 - T_2^4); \quad (2.19)$$

$$y = L_y; \quad x \in [L_x - b; L_x]; \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \alpha(T_3)(T_e - T_3) + \varepsilon\sigma(T_e^4 - T_3^4). \quad (2.20)$$

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. Дульневым в [7].

Приведенный коэффициент черноты поверхности зон и окружающей среды вычислялся по формуле [7]:

$$\varepsilon = \left( \frac{1}{\varepsilon_k} + \frac{1}{\varepsilon_e} - 1 \right)^{-1}. \quad (2.21)$$

$\varepsilon$  – приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды;  $\varepsilon_k$  – коэффициент черноты поверхности тела;  $\varepsilon_e$  – коэффициент черноты окружающей среды;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

### 2.1.3 Метод решения

Система дифференциальных нелинейных уравнений (2.2–2.4) с соответствующими начальными (2.7) и нелинейными граничными условиями (2.8 – 2.20) решены методом конечных разностей [64].

Для решения разностных аналогов двумерных уравнений использовалась схема расщепления по координатам [65]. Решение полученных одномерных разностных уравнений проводилось в два этапа:

1. Построение итерационного цикла для преодоления нелинейности граничных условий. В качестве начального приближения задавалось значение сеточной функции на предшествующем временном слое. После подстановки начального приближения получали линейное уравнение для определения первого приближения. Итерационный цикл заканчивался при условии:

$$\max |T_k^g - T_k^{g-1}| \leq \delta . \quad (2.22)$$

При достижении заданной точности осуществлялся переход к следующему временному слою. В принятом диапазоне температур целесообразно считать достаточной точностью вычислений  $\delta = 0,001 \text{ K}$ .

2. Для решения линейной системы уравнений на каждом шаге итерационного цикла использовался метод прогонки с применением неявной четырехточечной разностной схемы аппроксимации [64], обладающей абсолютной устойчивостью и хорошо себя зарекомендовавшей при решении задач теплопроводности [64, 65]. Для построения разностных аналогов исходного дифференциального уравнения вводили неравномерную прямоугольную сетку с пространственными узлами в точках  $x_m, y_j$ . Шаг расчета температуры по времени был равномерным. При приближении к области неоднородности шаг сетки по координатам  $x, y$  уменьшался с некоторым коэффициентом  $q$  в геометрической прогрессии.

$$t_n = n\tau, \quad n = 0, 1..N; \quad (2.23)$$

$$x_{m+1} = x_m \cdot q, \quad L_x = \frac{x_1(q^M - 1)}{q - 1}, \quad x_1 \neq 0, \quad q \neq 0, \quad m = 1, \dots, M - 1; \quad (2.24)$$

$$y_{j+1} = y_j \cdot q, \quad L_y = \frac{y_1(q^J - 1)}{q - 1}, \quad y_1 \neq 0, \quad q \neq 0, \quad j = 1, \dots, J - 1. \quad (2.25)$$

Аналог температуры:

$$T_{m,j}^n = T_k(x_m, y_j, t_n); \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N. \quad (2.26)$$

Аналог удельной тепловой мощности источника:

$$Q_{m,j}^n = Q(x_m, y_j, t_n); \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N. \quad (2.27)$$

Разностные аналоги первой и второй производной температуры по времени и координатам:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{m,j}^{n+1} - T_{m,j}^n}{\tau}; \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N - 1; \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{m+1,j}^{n+1} - 2T_{m,j}^{n+1} + T_{m-1,j}^{n+1}}{x_m^2}; \quad m = 2, \dots, M - 1; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N - 1; \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{m,j+1}^{n+1} - 2T_{m,j}^{n+1} + T_{m,j-1}^{n+1}}{y_j^2}; \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 2, \dots, J - 1; \quad n = 0, 1..N - 1; \quad (2.30)$$

В соответствие со схемой расщепления переход от  $n$  к  $n+1$  слою осуществлялся с помощью двух «дробных» шагов и уравнения (2.3, 2.4) заменялись эквивалентной системой уравнений:

$$C_{m,j} \rho_{m,j} \frac{T_{m,j}^{n+1/2} - T_{m,j}^n}{\tau} = \lambda_{m,j} \left( \frac{T_{m+1,j}^{n+1/2} - 2T_{m,j}^{n+1/2} + T_{m-1,j}^{n+1/2}}{x_m^2} \right) + \frac{1}{2} Q_{m,j}^n; \quad (2.31)$$

$$m = 2, \dots, M - 1; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N - 1;$$

$$C_{m,j} \rho_{m,j} \frac{T_{m,j}^{n+1} - T_{m,j}^{n+1/2}}{\tau} = \lambda_{m,j} \left( \frac{T_{m,j+1}^{n+1/2} - 2T_{m,j}^{n+1/2} + T_{m,j-1}^{n+1/2}}{y_j^2} \right) + \frac{1}{2} Q_{m,j}^n; \quad (2.32)$$

$$m = 1, \dots, M; \quad j = 2, \dots, J - 1; \quad n = 0, 1..N - 1.$$

Уравнение (2.31) есть сеточная аппроксимация предельно анизотропного процесса теплопередачи, при котором распространение тепла происходит лишь в направлении оси  $x$ ; аналогично можно истолковать

уравнение (2.32). Предполагалось, что попеременное распространение тепла по направлениям осей  $x$ ,  $y$  будет приближать реальный (изотропный) процесс, описываемый уравнениями (2.3, 2.4).

Свойства рассмотренной схемы решения двумерной задачи хорошо исследованы и широко освещены в литературе [64, 65]. Известно, что такая схема обладает суммарной аппроксимацией с погрешностью порядка  $0(\tau + (x_1)^2 + (y_1)^2)$  и безусловной устойчивостью.

Рассмотрим способ решения уравнения (2.31). Уравнение (2.32) решается аналогично.

Сгруппировав слагаемые, содержащие значения температуры на разных временных слоях, запишем:

$$T_{m+1,j}^{n+1/2} - \left( 2 + \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} x_m^2}{\tau \lambda_{m,j}} \right) T_{m,j}^{n+1/2} + T_{m-1,j}^{n+1/2} = - \left( \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} x_m^2}{\tau \lambda_{m,j}} T_{m,j}^n + \frac{x_m^2}{\lambda_{m,j}} \frac{1}{2} Q_{m,j}^n \right); \quad (2.33)$$

$$m = 2, \dots, M-1; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1, \dots, N-1;$$

Уравнение (2.33) записано для трех пространственных точек разностной схемы. Учитывая, что количество точек практически всегда более 3-х, поставленная краевая задача сводится к решению системы алгебраических уравнений типа (2.33) с заданными начальными и граничными условиями – разностными аналогами уравнений (2.8-2.20). Широко известным и эффективным способом решения таких уравнений является метод прогонки [65].

Сокращенно запишем уравнение (2.33) следующим образом:

$$A_m T_{m+1,j}^{n+1/2} - D_m T_{m,j}^{n+1/2} + B_m T_{m-1,j}^{n+1/2} = -F_m; \quad (2.34)$$

$$m = 1, 2, \dots, M-1; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где  $A_m = 1$ ;  $B_m = 1$ ;  $D_m = 2 + \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} (x_m)^2}{\tau \lambda_{m,j}}$ ;  $F_m = \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} (x_m)^2}{\tau \lambda_{m,j}} T_{m,j}^n + \frac{(x_m)^2}{\lambda_{m,j}} \frac{1}{2} Q_{m,j}^n$ .

Введем вспомогательные коэффициенты  $p_m$  и  $q_m$ . Согласно формулам прямой и обратной прогонок имеют место следующие зависимости:

$$p_{m+1} = \frac{B_m}{D_m - A_m p_m}, \quad m=1,2,\dots,M-1; \quad j=1,2,\dots,J; \quad (2.35)$$

$$q_{m+1} = \frac{A_m q_m + F_m}{D_m - A_m p_m}, \quad m=1,2,\dots,M-1; \quad j=1,2,\dots,J; \quad (2.36)$$

$$T_{m,j}^{n+1/2} = p_{m+1} T_{m+1,j}^{n+1/2} + q_{m+1}, \quad (2.37)$$

$$m = M-1, M-2, \dots, 1, 0; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Коэффициенты  $p_m$  и  $q_m$ , последовательно рассчитываются путем прямой прогонки, затем на их основе путем обратной прогонки рассчитываются значения  $T_{m,j}^{n+1/2}$ .

Коэффициенты  $p_1$ ,  $q_1$ ,  $T_{M,j}^{n+1/2}$  определяются с помощью разностных аналогов уравнений (2.8, 2.9), описывающих граничные условия, следующим образом. Запишем разностный аналог уравнения (2.8):

$$\frac{T_{1,j}^{n+1/2} - T_{0,j}^{n+1/2}}{x_1} = 0; \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (2.38)$$

Преобразуем это уравнение:

$$T_0 = T_1. \quad (2.39)$$

Учитывая, что из (2.35) следует  $T_0 = p_1 T_1 + q_1$ , получим:  $p_1 = 1$ ,  $q_1 = 0$ .

Запишем разностный аналог уравнения (2.9):

$$\frac{T_M - T_{M-1}}{x_M} = 0. \quad (2.40)$$

Преобразуем это уравнение:

$$T_{M-1} = T_M. \quad (2.41)$$

Учитывая, что из (2.35) следует  $T_{M-1} = p_M T_M + q_M$ , подставив это выражение в (2.39), получим:  $T_M = \frac{q_M}{1 - p_M}$ .

## 2.2 Моделирование двумерных температурных полей в проводнике круглого поперечного сечения

### 2.2.1 Физическая постановка

Радиоэлектронное оборудование компонуются из многочисленных деталей и элементов. Не обходится проектирование электронных схем и без навесных компонентов (резисторов, конденсаторов, металлических проводников) рис. 2.3. Металлические перемычки на электронных платах обычно выполнены в виде проводников круглого поперечного сечения [66]. Процессы окисления могут протекать на этих внешних проводниках. Скорость окисления металла зависит от температуры, поэтому решалась задача теплопереноса в проводнике.

Рассматривалась задача теплопереноса в типичном проводнике круглого поперечного сечения. Областью решения был проводник покрытый изоляцией. В полимерном защитном покрытии рассматривалась микротрещина (рис. 2.4). Проводник нагревался за счет движения электрических зарядов.

### 2.2.2 Математическая постановка

В двумерной постановке задача сводилась к решению нестационарных уравнений теплопроводности:

$$C_k \cdot \rho_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \cdot \left( \frac{\partial^2 T_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_k}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T_k}{\partial \varphi^2} \right) + Q, \text{ при } k = 1; \quad (2.42)$$

$$C_k \cdot \rho_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \cdot \left( \frac{\partial^2 T_k}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_k}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T_k}{\partial \varphi^2} \right), \text{ при } k = 2, 3. \quad (2.43)$$

Интенсивность тепловыделения в проводнике рассчитывалась по выражению (2.5).

Область решения ограничивалась следующими временными и геометрическими условиями:

$$t \in [0; t_m], \quad r \in [0; L_r], \quad \varphi \in [0; 360], \quad (2.44)$$

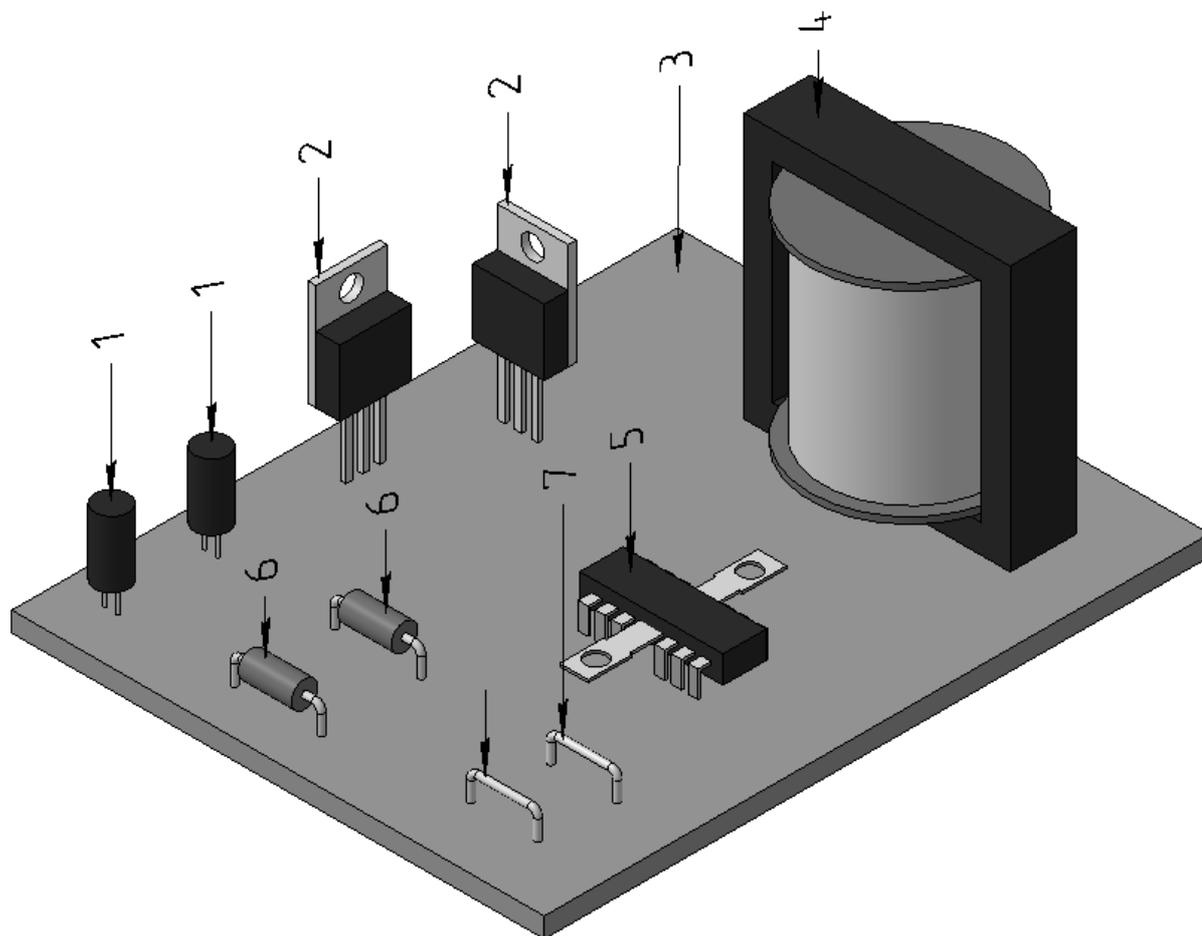


Рисунок 2.3 Электронной прибор и его компоненты:

1 – конденсаторы; 2 – транзисторы; 3 – печатная плата; 4 – трансформатор; 5 – интегральная микросхема; 6 – резисторы; 7 – металлические перемычки

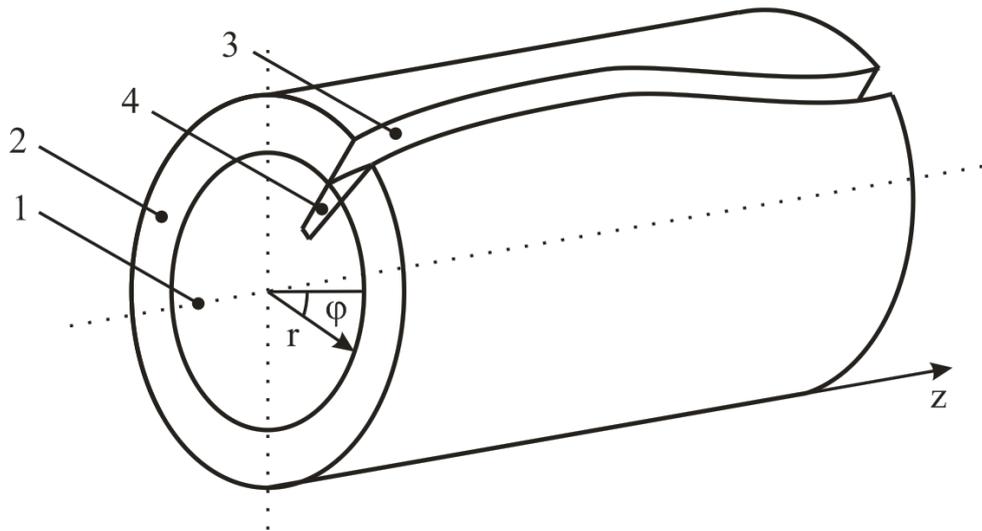


Рисунок 2.4. Медный проводник, покрытый изоляцией: 1 – проводник; 2 – изоляция; 3 – воздушный слой; 4 – оксидный слой

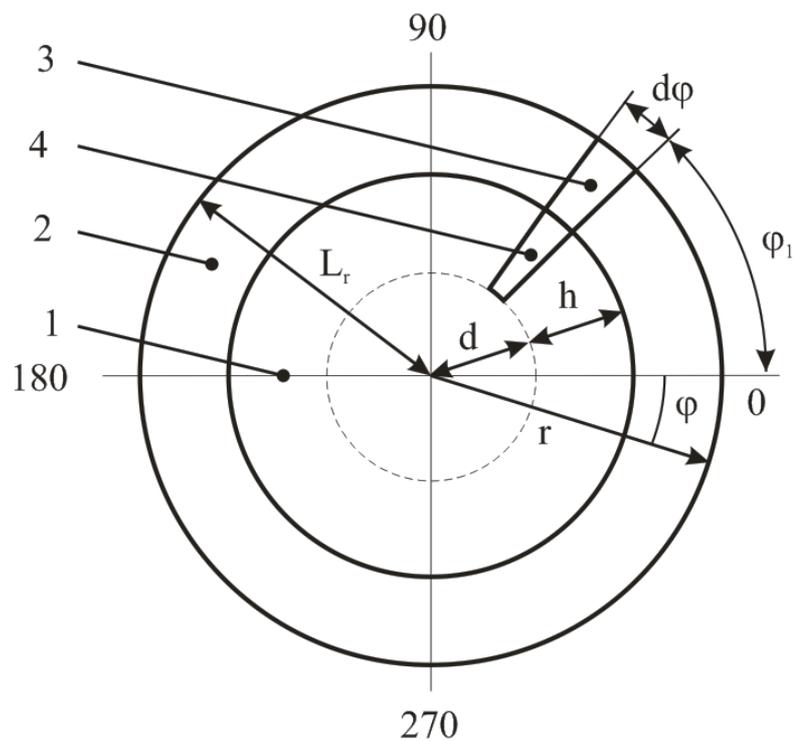


Рисунок 2.5. Область решения задачи:

1 – металлический проводник; 2 – изоляция; 3 – воздух; 4 – пленка окисла

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

$$T_k = T_0, \text{ при } t = 0. \quad (2.45)$$

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

$$r = 0; \varphi \in [0; 360]; \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0; \quad (2.46)$$

$$r = d; \varphi \in [\varphi_1; \varphi_1 + d\varphi]; \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}; T_1 = T_4; \quad (2.47)$$

$$r = d + h; \varphi \in [0; \varphi_1]; \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; T_1 = T_2; \quad (2.48)$$

$$r = d + h; \varphi \in [\varphi_1; \varphi_1 + d\varphi]; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r}; T_3 = T_4; \quad (2.49)$$

$$r = d + h; \varphi \in [\varphi_1 + d\varphi; 360]; \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; T_1 = T_2; \quad (2.50)$$

$$r = L_r; \varphi \in [0; \varphi_1]; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha(T_2)(T_0 - T_2) + \varepsilon\sigma(T_0^4 - T_2^4); \quad (2.51)$$

$$r = L_r; \varphi \in [\varphi_1; \varphi_1 + d\varphi]; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha(T_3)(T_0 - T_3) + \varepsilon\sigma(T_0^4 - T_3^4); \quad (2.52)$$

$$r = L_r; \varphi \in [\varphi_1 + d\varphi; 360]; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha(T_2)(T_0 - T_2) + \varepsilon\sigma(T_0^4 - T_2^4); \quad (2.53)$$

$$r \in [0; d + h]; \varphi = 0; \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} = 0; \quad (2.54)$$

$$r \in [d + h; L_r]; \varphi = 0; \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} = 0. \quad (2.55)$$

Приведенный коэффициент черноты поверхности тела и окружающей среды вычислялся по формуле (2.21).

Метод решения дифференциальных уравнений (2.42, 2.43) с соответствующими начальными (2.45) и граничными условиями (2.46 – 2.55) аналогичен методу решения уравнений (2.3, 2.4) – применялся метод

конечных разностей. Для решения разностных аналогов двумерных уравнений также использовалась схема расщепления по координатам. Решение полученных одномерных разностных уравнений проводилось в два этапа:

1. Построение итерационного цикла для преодоления нелинейности граничных условий.

2. На каждом шаге итерационного цикла решалась линейная система уравнений методом прогонки с применением неявной четырехточечной разностной схемы аппроксимации.

Для построения разностных аналогов исходного дифференциального уравнения вводилась неравномерная цилиндрическая сетка с пространственными узлами в точках  $r_m$ ,  $\varphi_j$  и временными узлами в точках  $t^n$ . При приближении к области неоднородности сетка сгущалась с некоторым коэффициентом  $q$  в геометрической прогрессии.

$$t^n = n\tau, \quad n = 0, 1..N; \quad (2.56)$$

$$r_{m+1} = r_m \cdot q, \quad L_r = \frac{r_1(q^M - 1)}{q - 1}, \quad r_1 \neq 0, \quad q \neq 0, \quad m = 1, \dots, M - 1; \quad (2.57)$$

$$\varphi_{j+1} = \varphi_j \cdot q; \quad 360^\circ = \frac{\varphi_1(q^J - 1)}{q - 1}; \quad \varphi_1 \neq 0; \quad q \neq 0; \quad j = 1, \dots, J; \quad (2.58)$$

Аналог температуры:

$$T_{m,j}^n = T(r_m, \varphi_j, t^n); \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N. \quad (2.59)$$

Аналог удельной тепловой мощности источника:

$$Q_{m,j}^n = Q(r_m, \varphi_j, t^n); \quad m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N. \quad (2.60)$$

В соответствие со схемой расщепления переход от  $n$  к  $n+1$  осуществлялся с помощью двух «дробных» шагов и уравнения (2.42, 2.43) заменялись эквивалентной системой уравнений:

$$C_{m,j} \rho_{m,j} \frac{T_{m,j}^{n+1/2} - T_{m,j}^n}{\tau} = \lambda_{m,j} \left( \frac{T_{m+1,j}^{n+1/2} - 2T_{m,j}^{n+1/2} + T_{m-1,j}^{n+1/2}}{r_m^2} + \frac{1}{L_r} \frac{T_{m,j}^{n+1/2} - T_{m-1,j}^{n+1/2}}{r_m} \right) + \frac{1}{2} Q_{m,j}^n; \quad (2.61)$$

$$m = 1, \dots, M - 1; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1..N - 1.$$

$$C_{m,j} \rho_{m,j} \frac{T_{m,j}^{n+1/2} - T_{m,j}^{n+1}}{\tau} = \lambda_{m,j} \left( \frac{1}{L_r^2} \frac{T_{m,j+1}^{n+1/2} - 2T_{m,j}^{n+1/2} + T_{m,j-1}^{n+1/2}}{\varphi_j^2} \right) + \frac{1}{2} Q_{m,j}^n; \quad (2.62)$$

$$m = 1, \dots, M; \quad j = 1, \dots, J-1; \quad n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Уравнение (2.61) есть сеточная аппроксимация предельно анизотропного процесса теплопередачи, при котором распространение тепла происходит лишь в направлении оси  $r$ ; аналогично можно истолковать уравнение (2.62). Предполагалось, что попеременное распространение тепла по направлениям осей  $r$ ,  $\varphi$  будет приближать реальный (изотропный) процесс, описанный уравнениями (2.42, 2.43).

Представленная схема обладает суммарной аппроксимацией с погрешностью порядка  $O(\tau + r_1^2 + \varphi_1^2)$  и безусловной устойчивостью.

Рассмотрим способ решения уравнения (2.61), уравнение (2.62) решается аналогично.

Сгруппировав слагаемые, содержащие значения температуры на разных временных слоях, запишем:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r_m} T_{m+1,j}^{n+1/2} - \left( \frac{2}{r_m} + \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} r_m}{\tau \lambda_{m,j}} - \frac{1}{L_r} \right) T_{m,j}^{n+1/2} + T_{m-1,j}^{n+1/2} \left( \frac{1}{r_m} - \frac{1}{L_r} \right) = \\ & = - \left( \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} r_m^2}{\tau \lambda_{m,j}} T_{m,j}^n + \frac{r_m}{\lambda_{m,j}} \frac{1}{2} Q_{m,j}^n \right); \end{aligned} \quad (2.63)$$

$$m = 1, \dots, M-1; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Сокращенно запишем уравнение (2.63) следующим образом:

$$A_m T_{m+1,j}^{n+1/2} - D_m T_{m,j}^{n+1/2} + B_m T_{m-1,j}^{n+1/2} = -F_m; \quad m = 1, \dots, M-1; \quad j = 1, \dots, J; \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.64)$$

$$\text{где} \quad A_m = \frac{1}{r_m}; \quad B_m = \frac{1}{r_m} - \frac{1}{L_r}; \quad D_m = \frac{2}{r_m} + \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} r_m}{\tau \lambda_{m,j}} - \frac{1}{L_r};$$

$$F_m = \frac{C_{m,j} \rho_{m,j} r_m^2}{\tau \lambda_{m,j}} T_{m,j}^n + \frac{r_m}{\lambda_{m,j}} \frac{1}{2} Q_{m,j}^n.$$

Уравнение (2.64) решено методом прогонки аналогично (2.34).

### 2.3 Тестирование математических моделей и методов решения

Из-за отсутствия экспериментальных данных оценка достоверности полученных в ходе вычислений результатов по температурным полям проводников типичного элемента ППП проводилась проверкой консервативности разностной схемы аналогично [4].

Погрешность по балансу энергии определялась с помощью выражения:

$$\eta = \frac{|U_1 - (U_2 + U_3)|}{U_1} \cdot 100\%, \quad (2.65)$$

$$U_1 = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J Q_{m,j}^n \cdot x_m \cdot y_j \cdot z \cdot N \cdot \tau; \quad (2.66)$$

$$U_2 = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \alpha(T_{m,j}^n) \cdot (T_{m,j}^n - T_6) \cdot x_m \cdot z \cdot \tau; \quad (2.67)$$

$$U_3 = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J C_{m,j} \cdot \rho_{m,j} \cdot (T_{m,j}^n - T_6) \cdot x_m \cdot y_j \cdot z; \quad (2.68)$$

где  $U_1$  – тепловыделение прибора за время  $N \cdot \tau$ ;  $U_2$  – тепло отведенное от корпуса прибора через боковую поверхность за время  $N \cdot \tau$ ;  $U_3$  – тепло, накопленное внутри прибора.

При оценке достоверности результатов любых теоретических исследований используются различные приемы, их условно можно разделить на группы.

1. Сравнение полученных теоретических следствий с известными ранее или установленными автором диссертации экспериментальными значениями основных характеристик исследуемых процессов.
2. Сравнение полученных теоретических следствий с теоретическими результатами других авторов, решавших эти же задачи.
3. Сравнение результатов решения относительно простых по сравнению с решавшейся в диссертации, но в то же время

достаточно сложных в целом задач, решенных другими авторами. В этом случае метод решения и алгоритм, разработанный автором диссертации для решения своей задачи тестируется на примерах, имеющих косвенное отношение к задаче диссертации, и по которым есть документированные найденные результаты, опубликованные в печати.

4. Проверки консервативности разностной схемы на последовательностях сгущающихся сеток или по выполнению законов сохранения энергии или массы при решении диссертационных задач.

Поставленные в ведении задачи ранее не рассматривались другими авторами. Поэтому нет условий для сравнения результатов исследований, приведенных ниже, с результатами других авторов.

Обоснование надежности разработанных в диссертации метода и алгоритма и, соответственно достоверности полученных результатов путем верификации на решениях менее сложных задач, по которым ранее опубликованы какие либо материалы, представляется автору настоящей работы недостаточно убедительным. Так, например, тест по двухслойной задаче теплопроводности для материалов существенно отличающимися теплофизическими характеристиками с одной стороны при его успешной реализации демонстрирует работоспособность метода и алгоритма решения новой задачи. Но если при этом необходимо рассчитывать температурное поле в области с подвижной границей, то задача кардинально усложняется. Выполнение при этом теста на задаче с подвижными границами недостаточно для обоснования достоверности полученных новых результатов.

Более того любое усложнение постановки в частности усложнения физической (соответственно и математической) модели в большинстве случаев приводит к необходимости разработки специальных мероприятий по

модернизации используемого численного метода применительно к конкретной постановке.

Так, например, в некоторых случаях при решении задач теплопроводности применительно к элементам РЭА или ЭТ можно пренебрегать лучистым нагревом. В этом случае решения могут быть получены относительно просто. Но если радиационный теплоперенос является значимым, то его нельзя не учитывать. Соответственно необходимо решать задачу итерационным методом, для реализации которого необходимы специальные алгоритмы и таких примеров можно приводить много. То есть тест на простой задаче не гарантирует правильные решения существенно более сложной.

Кроме проверки по балансу энергии в области решения по выше описанному алгоритму проводилась проверка достоверности результатов на последовательностях сгущающихся сеток. Область решения последовательно разбивалась на определенное число узлов по пространственным координатам. На этой сетке задача решалась. Затем число узлов удваивалось и задача решалась вновь. Если отличия по основным характеристикам процесса (температуры этих двух решений) были достаточно малы (менее 1 %) дальнейшие численные исследования проводились на первой сетке. Если отличия в значениях температуры были существенными (более 1 %) сетка сгущалась вновь и проводилась аналогичная процедура. Процесс выбора соответствующих параметров проводился до достижения условий, когда результаты решения почти не зависели от изменения сеточных параметров. Аналогичная процедура проводилась и при выборе величины шага разностной сетки по времени. Анализ решения аналогичных задач показал, что величина  $\Delta\tau$  существенно влияет на сходимость решения. Особенно велико влияние этого параметра на результат при решении задач теплопереноса для областей с разрывами коэффициентов теплопроводности, как в диссертационном исследовании. Поэтому шаг по времени выбирался

таким, чтобы его дальнейшее изменение не приводило к значимым отклонениям результатов вычислений.

## **2.4 Постановка задачи моделирования процессов окисления металлических проводников**

### **2.4.1 Физико-химические процессы окисления металлов в РЭА**

Так как металлы – основные проводниковые радиотехнические материалы, используемые в производстве электронных приборов очень важно не допускать развития процессов окисления в металлах, которые, как показывает анализ причин отказов электронного оборудования, являются одной из главных причин.

Металлы под действием различных физико-химических и биологических факторов разрушаются. Такое разрушение металлов при воздействии внешней среды получило название коррозии металлов.

Под коррозией металлов подразумевают нежелательный процесс взаимодействия металла со средой. Физико-химическая сущность изменений, которые претерпевает металл при коррозии является окисление металла.

Известно что большинство металлов (кроме Ag, Pt, Cu, Au) встречаются в природе в ионном состоянии: оксиды, сульфиды, карбонаты и др., называемые обычно руды металлов.

Ионное состояние более выгодно, оно характеризуется меньшей внутренней энергией. Это заметно при получении металлов из руд и их коррозии. Поглощенная энергия при восстановлении металла из соединений свидетельствует о том, что свободный металл обладает более высокой энергией, чем металлическое соединение. Это приводит к тому, что металл находящийся в контакте с коррозионно-активной средой стремится перейти в энергетически выгодное состояние с меньшим запасом энергии.

Скорость коррозионного процесса, имеющая решающее значение, зависит от множества одновременно действующих факторов: внутренних, характеризующих природу металла; технологию его изготовления; состав

сплава; тип структуры; внутреннее напряжение; состояние поверхности и внешних, характеризующих состав агрессивной среды и условия протекания процесса (температуру, давление, гидродинамические условия). Информацию о скорости возможного (по термодинамической оценке) коррозионного процесса и о характере влияния различных факторов на итог процесса дают кинетические исследования.

Коррозионные процессы протекают на границе раздела фаз при взаимодействии твердого вещества с газом или жидкостью; такой механизм взаимодействия называют гетерогенным. Простейшую схему гетерогенного процесса можно представить в виде следующих основных этапов:

- а) транспортировка реагирующих веществ к поверхности раздела фаз;
- б) химическое взаимодействие;
- в) отвод продуктов реакции из реакционной зоны.

Любой из этапов схемы может состоять из элементарных стадий, протекающих последовательно, параллельно, сопряженно. Скорость коррозии определяется скоростью процессов самой медленной из последовательно протекающих стадий, либо скоростью самой быстрой из параллельных стадий. Установление лимитирующей стадии процесса – ключевой вопрос кинетики коррозионных процессов.

Поскольку коррозионный процесс – система взаимосвязанных явлений (электрохимических и химических реакций и процессов переноса), то их классифицируют по признакам, которые определяют коррозионные процессы и особенности их протекания.

По механизму реакции взаимодействия различают два основных типа коррозии металлов: химическую и электрохимическую.

По виду агрессивной среды, принимающей участие в процессе разрушения металлов, различают газовую, атмосферную, в растворах электролитов и коррозию в жидкостях - неэлектролитах.

Химическая коррозия – процесс разрушения металлов под действием внешней среды, вступающей с ним в химическое взаимодействие. Такие процессы не сопровождаются образованием электрического тока.

Повышение температуры среды, наличие растворенного в жидкости кислорода приводит к усилению процесса коррозии. Присутствие в жидких неэлектролитах влаги обеспечивает интенсивное протекание процесса коррозии по электрохимическому механизму. Алюминий разрушают даже безводные хлорсодержащие органические растворители.

#### **2.4.2 Механизмы и кинетика коррозии алюминиевой металлизации в электролите**

Как было сказано в первой главе, значительное число отказов микросхем (50% всех отказов), тем более большей степени интеграции происходят из-за коррозии металлизации (внутрисхемных проводников). Основными причинами процессов окисления металлов являются конденсация паров воды, наличие электрических смещений и ионных загрязнений на поверхности кристалла ИС. Такая проблема надежности микросхем и других образцов элементной базы была известна еще в 80-х годах прошлого века [33–38]. Анализом механизмов отказов изделий радиоэлектроники и разработкой моделей прогнозирования характеристик надежности электронного оборудования занимались такие авторы как Русанова, Волков, Теверовский.

В своих работах они задавались целью разработать модели прогнозирования характеристик надежности электронных приборов. Так например, в работе [37] исследуется механизм коррозии алюминиевой металлизации ИС в условиях конденсации паров воды на поверхности кристалла при внешней катодной поляризации. С целью обоснования механизма коррозии алюминиевой металлизации при внешней катодной поляризации изучалась температурная зависимость в диапазоне температур от 25 до 90 С° скорости коррозии алюминия при изменении величины

плотности тока в диапазоне  $(0,3\div 4) \cdot 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup> и при отсутствии внешней поляризации.

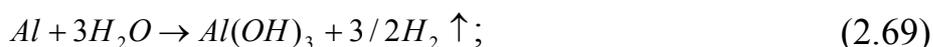
Исследования показали, что средняя скорость коррозии на катодах в растворах различных электролитов не зависит от природы аниона электролита и остается приблизительно неизменной в нейтральной и кислой (до pH=3,3) средах.

Анализ результатов показал, что при данных плотностях внешнего тока даже в кислой среде имеет место повышение pH раствора у катода. Это объяснялось уменьшением концентрации ионов водорода (гидроксония) вблизи поверхности катода при прохождении электрического тока, т.е. наличием концентрационной поляризации вследствие ограничения скорости электрохимической реакции выделения водорода диффузией его ионов к катоду.

Механизм и кинетика коррозии алюминиевой металлизации ИС заключается в следующем [37].

На катоде в рассматриваемом случае одновременно протекают два процесса: химическое окисление алюминия молекулами воды и прикатодное восстановление водорода из молекул воды вследствие наличия внешней поляризации.

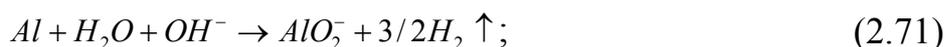
Растворение Al протекает в две стадии



и, в связи с амфотерными свойствами  $Al(OH)_3$ .



Суммарная реакция может быть представлена в виде:



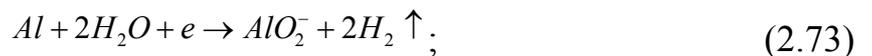
Восстановление водорода из молекул воды вследствие внешней поляризации протекает по реакции:



В области температур до  $T_k$  скорость реакции (2.70) ниже, чем электродной реакции (2.72), и скорость растворения алюминия на катоде лимитировалось скоростью реакции (2.70).

При увеличении температуры свыше  $T_k$  скорость процесса коррозии на катоде ограничивалось скоростью электродной реакции (2.72), являющейся наиболее медленной стадией процесса, протекающего поэтапно в последовательности (2.72) и (2.71).

При этом суммарная реакция



Ограничение скорости коррозии алюминия при температурах  $T > T_k$  плотностью тока электролиза обуславливалось уменьшением pH раствора у катода (при постоянной плотности тока) за счет более существенного влияния ускорения процессов диффузии и электромиграции  $OH^-$  к аноду, а  $H^+$  к катоду на изменение pH, чем увеличения ионного произведения воды [37].

С увеличением плотности тока значение  $T_k$  смещалось в область более высоких температур. Это объясняется тем, что с увеличением плотности тока значение концентрации  $OH^-$  на поверхности металл-раствор возрастает (при постоянной температуре), поэтому скорость реакции (2.70) не зависит от скорости реакции (2.72) до более высоких значений температуры.

Автор предлагает модель комплексного влияния температуры и относительной влажности на время до отказа ИС [37].

Скорость коррозии алюминия на катоде в области  $T \leq T_k$  [37] описывалось выражением

$$V = k' j^m \exp(-E_1 / kT), \quad (2.74)$$

где  $k'$  – предэкспоненциальный множитель;  $m$  – показатель степени;  $j$  – плотность тока диффузии;  $E_1$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура металла.

Удельная скорость коррозии алюминия на катоде определялась как уменьшение числа атомов металла в единицу времени на единице площади поверхности раздела металл–раствор [37]:

$$\frac{-dN}{dtS} = ai^m \exp(-E/kT), \quad (2.75)$$

где  $N$  – число атомов металла;  $t$  – время реакции;  $m$ ,  $a$  – постоянные;  $E$  – энергия активации процесса коррозии;  $i$  – плотность катодного тока;  $S$  – площадь катода.

Считалось, что отказ ИС наступит, если прокорродирует некоторое критическое количество атомов алюминия на катоде, зависящее от топологических и функциональных особенностей ИС [37]:

$$\Delta N_{\text{крит}} = \Delta V \rho / A, \quad (2.76)$$

где  $\Delta V$  – объем прокорродировавшего Al;  $\rho$  – плотность алюминия;  $A$  – вес грамм-атома алюминия.

Выражения (2.75 и 2.76) могут быть использованы для прогнозирования времени разрушения металлизации:

$$t_{\text{отк}} = \Delta V \rho / Aa(I)^{-m} S^{m-1} \exp(E/kT), \quad I = iS, \quad (2.77)$$

где  $I$  – ток электролиза.

$$I = (\varepsilon - \varepsilon_0)\sigma, \quad \sigma = \sigma_{\text{уд}}hl/d, \quad (2.78)$$

где  $\varepsilon$  – электродвижущая сила (ЭДС) внешнего источника;  $\varepsilon_0$  – ЭДС окисления алюминия;  $\sigma$  – электропроводность цепи;  $\sigma_{\text{уд}}$  – удельная электропроводность электролита;  $h$ ,  $l$  – толщина и длина дорожки металлизации ИС;  $d$  – расстояние между соседними дорожками металлизации ИС, образующими электролитическую ячейку.

Оценив модель окисления металлизации ИС [37] можно сделать некоторые выводы. В работе [37] подробно исследована кинетика окисления алюминиевой металлизации микросхемы в электролите. Однако, в радиотехнических материалах возможно протекание процессов газовой коррозии - взаимодействие металла с кислородом. Таких моделей окисления металлических радиотехнических материалов и изделий на их основе, а

также методик прогнозирования характеристик надежности радиоэлектронного оборудования с учетом окисления к сожалению пока нет.

В работе [37] получена характеристика надежности интегральных схем - время до отказа электронного прибора. Эта характеристика безусловно является показателем надежности электронного оборудования, однако в привычном понимании надежности электронных приборов большинство отечественных и зарубежных специалистов по прогнозированию надежности электронных компонентов пользуются характеристикой - интенсивность отказов [25].

Методики прогнозирования интенсивности отказов электронных приборов с учетом окисления металла и интенсивного теплопереноса в радиотехнических материалах и изделий на их основе к сожалению тоже пока отсутствуют. Известно, что отказы из-за коррозии металлизации встречаются довольно часто о чем свидетельствуют источники [24-26, 33-42]. Отказы как показывает анализ [25] происходят из-за дефектов корпусов электронных приборов. Поэтому диссертационная работа является актуальной и своевременной.

Считаем, что модель окисления алюминиевой металлизации микросхем может быть использована в настоящих диссертационных исследованиях.

### **2.4.3 Кинетика окисления металла (меди и алюминия) кислородом**

В РТИ применяются различные металлы, например, медь, алюминий, золото, серебро. В качестве металлизации в ППП и ИС применяют медные и алюминиевые напыления [67].

При взаимодействии с кислородом медь и алюминий легко окисляется, создавая оксидный слой [68]. Скорость химической реакции металла с окислителем зависит от различных факторов, главным из которых является температура [68].

Уменьшение площади поперечного сечения металлических напылений приводит к изменению электрических режимов работы электронной схемы, и

соответственно надежности электронного прибора [69]. Уменьшение сечения проводника тока при постоянстве последнего влечет за собой возрастание интенсивности тепловыделения, которое в свою очередь интенсифицирует процессы окисления в металле.

Скорость, с которой протекает коррозия, с трудом поддается теоретическому вычислению. Как правило, она определяется опытным путем. Скорость прежде всего зависит от характера образующихся продуктов коррозии и прочности их сцепления с металлом [68]. Например для кровельных материалов скорости окисления приведены в табл. 1.

Таблица 1. [70]

Скорость коррозии на воздухе (мкм/год)				
Атмосфера	Алюминий	Свинец	Цинк	Железо
Сельская	0,75	0,7	1,25	20
Городская	2,25	1,1	2,25	40
Промышленная	3,25	1,5	3,25	60
Морская	5,25	1,9	4,25	80

В воде и других жидкостях так же как и в воздухе присутствуют агрессивные вещества, которые могут вызывать коррозию материалов, например трубопровода табл. 2.

Таблица 2. [70]

Коррозия металлов г/м <sup>2</sup> ·год				
Материал	Теплоноситель			
	Антифриз	Этиленгликоль	Вода	CaCl
Сталь углеродистая (СК22)	0,5	152	76	95
Чугун сантехнический (GG25)	0,5	273	192	310
Медь	0,5	2,8	1	11
Латунь (Cu63Zn37)	0,6	7,6	1	36
Алюминий, литье	1,4	16	32	135
Алюминий (99,5)	2	—	5	660

Мягкий припой (WL30)	2,4	135	11	443
По процедуре ASTM1384 (336часов/88°C, подпитка атм. воздухом бл/ч.)				
Антифриз-этиленгликоль с ингибиторами коррозии, водный раствор 1:2				
Этиленгликоль-водный раствор 1:2, без ингибиторов коррозии				
Вода-централизованного водоснабжения, общая жесткость 5,0 мг-экв/л				
CaCl – раствор хлорида кальция 21%				

Коррозия металлов чаще всего сводится к окислению и превращению в оксиды. Некоторые металлы, и в первую очередь медь, при коррозии покрываются плотной, хорошо скрепленной с металлами оксидной пленкой, которая не позволяет кислороду воздуха и воде проникнуть в более глубокие слои и потому предохраняет металл от дальнейшего окисления.

Однако воздух часто содержит оксиды серы, азота, углерода и другие вещества, а в воде – растворенные газы и соли. Поэтому процесс коррозии может быть во первых заметно ускорен, а во вторых продолжать протекать.

Рассматривали простые гомогенные химические реакции (протекающие в пределах одной стадии) в открытой системе (материальный обмен с окружающей средой): окисления металлов кислородом воздуха.

Стехиометрические уравнения реакции окисление меди и алюминия кислородом воздуха представлены ниже.



Скорость химической реакции металла с кислородом рассчитывалась с помощью выражения [71]:

$$W = \frac{\theta}{h} \rho_3 n_1, \quad \theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_4}\right). \quad (2.81)$$

Здесь  $W$  – скорость химической реакции по окислителю (кислороду), она прямо пропорциональна концентрации окислителя  $n_1$  и обратно пропорциональна толщине оксидной пленки  $h$ ;  $\theta$  – константа скорости химической реакции;  $\theta_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $n_1$  – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности металла;  $E_1$

– энергия активации процесса окисления;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Относительная массовая концентрация кислорода на поверхности металла находилась из условия равенства массового потока кислорода к поверхности и скорости его потребления в химических превращениях [71]:

$$n_1 = n_2 \left( \frac{\theta d^2}{h\phi(d+h)^2} + 1 \right)^{-1}, \quad \phi = \frac{\text{Nu}_H D}{d+h}, \quad D = \frac{\lambda_3}{C_3 \rho_3}, \quad (2.82)$$

где  $n_2$  – относительная массовая концентрация кислорода в воздухе;  $d$  – толщина проводника в области окисления;  $\phi$  – коэффициент массообмена;  $\text{Nu}_H$  – диффузионный критерий Нуссельта;  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в воздухе.

Плотность химического тепловыделения реакции окисления на поверхности металла определялась выражением

$$q = Q_2 \cdot W = Q_2 \frac{\theta}{h} \rho_3 n_2 \left( \frac{\theta}{h\phi} \frac{d^2}{(d+h)^2} + 1 \right)^{-1}, \quad (2.83)$$

где  $Q_2$  – тепловой эффект реакции, рассчитанный на единицу массы кислорода, Дж/кг  $\text{O}_2$ .

Согласно (2.81), изменение толщины оксидной пленки на поверхности металла во времени описывалось дифференциальным уравнением:

$$\rho_4 \frac{\partial h}{\partial t} = \Omega_1 \rho_3 n_1 \frac{\theta d^2}{h(d+h)^2}, \quad \Omega_1 = M_4 v_4 / M_3 v_3, \quad h_{(t=0)} = h_0. \quad (2.80)$$

где  $M_1$ ,  $M_3$ ,  $M_4$  – молярные массы металла, кислорода и оксида соответственно;  $v_1$ ,  $v_3$ ,  $v_4$  – стехиометрические коэффициенты;  $h_0$  – начальная толщина оксидной пленки.

Дифференциальное уравнение для описания изменения толщины металла:

$$-\frac{1}{2} \rho_1 \frac{\partial d}{\partial t} = \Omega_2 \rho_3 n_1 \frac{\theta}{h}, \quad \Omega_2 = M_1 v_1 / M_3 v_3, \quad d_{(t=0)} = d_0. \quad (2.81)$$

где  $d_0$  – начальная толщина металла.

Оценка параметров процесса окисления металлических проводников  $\theta_0$ ,  $E_1$  (2.81) представляется сложной задачей. В большинстве случаев такие характеристики в литературе не приводятся. Однако, обработкой литературных данных удалось определить эти величины для исследуемых металлов. Параметры представлены в табл. 3.

Таблица 3. Числовые характеристики процесса окисления металлов [72]

Металл	$\theta_0$	$E_1$ , эВ
Медь	0,1	0,41
Алюминий	0,15	0,47

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ И ИЗМЕНЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

#### **3.1 Численная оценка характеристик надежности стабилизатора напряжения в условиях термического окисления токоведущих элементов.**

Объектом исследования был выбран типичный и широко распространенный низкочастотный транзистор КТ819А большой мощности, выполненный в металлопластиковом корпусе ТО–220, (рис. 3.1, 3.2). Этот электронный прибор используется в типовых схемах усиления, генерации, выпрямления сигналов.

Для определенности в данном случае транзистор рассматривался как силовой элемент Q5 стабилизатора напряжения, электрическая принципиальная схема которого приведена на рис. 3.3.

Номинальные значения параметров стабилизатора напряжения приведены в табл. 3.1.

Анализ режимов работы электронного прибора проведен с использованием пакета схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 [73-75]. С его использованием установлены значения постоянных токов в электронной схеме рис. 3.3. Установлено значение постоянного тока в цепи резистора R6 - представляющего исследуемый проводник  $I = 0,5 A$ .

Ставилась задача оценить изменения его характеристики надежности – интенсивность отказов при окислении металлических элементов в условиях интенсивного тепломассообмена транзистора с окружающей средой.

Для моделирования процессов окисления металла в транзисторе необходимо знать температуру проводника, поэтому решалась задача тепломассопереноса в проводнике транзистора.

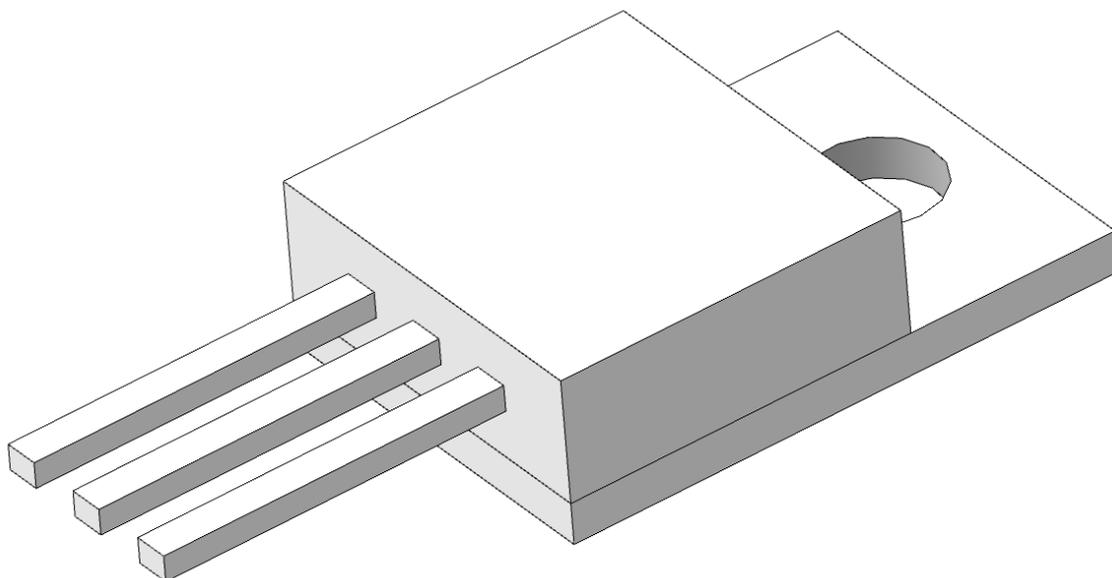


Рисунок 3.1. Общий вид транзистора КТ819А

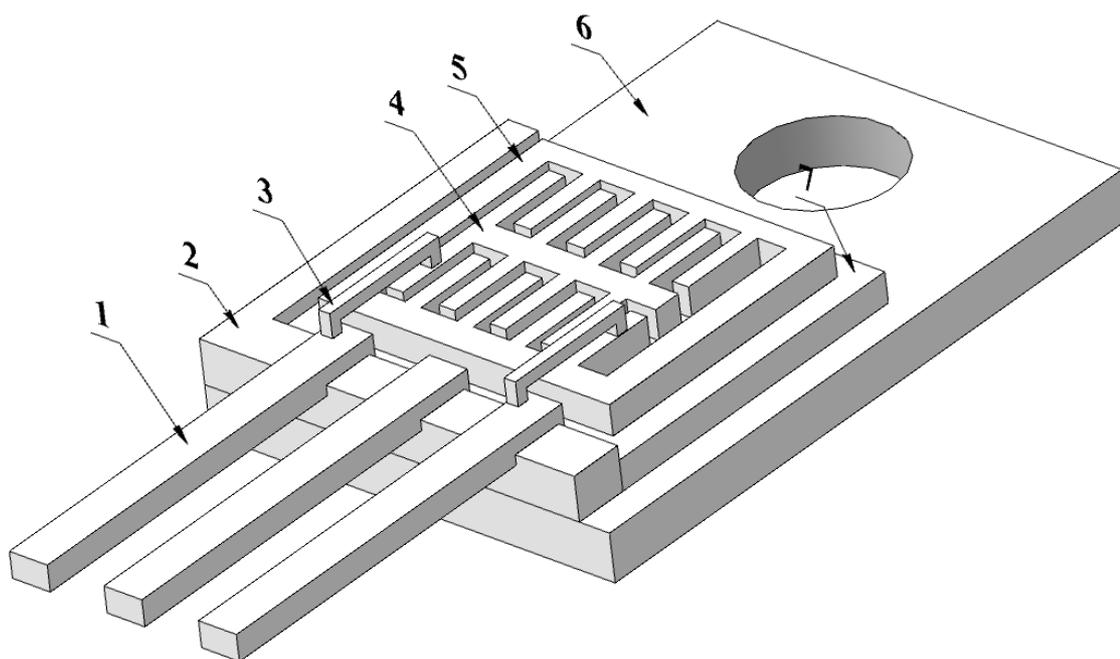


Рисунок 3.2. Вид транзистора КТ819А в разрезе:

1 – внешние выводы; 2 – корпус прибора; 3 – медный проводник; 4 – эмиттерное медное напыление на кристалле; 5 – базовое медное напыление на кристалле; 6 – медное основание; 7 – кристалл

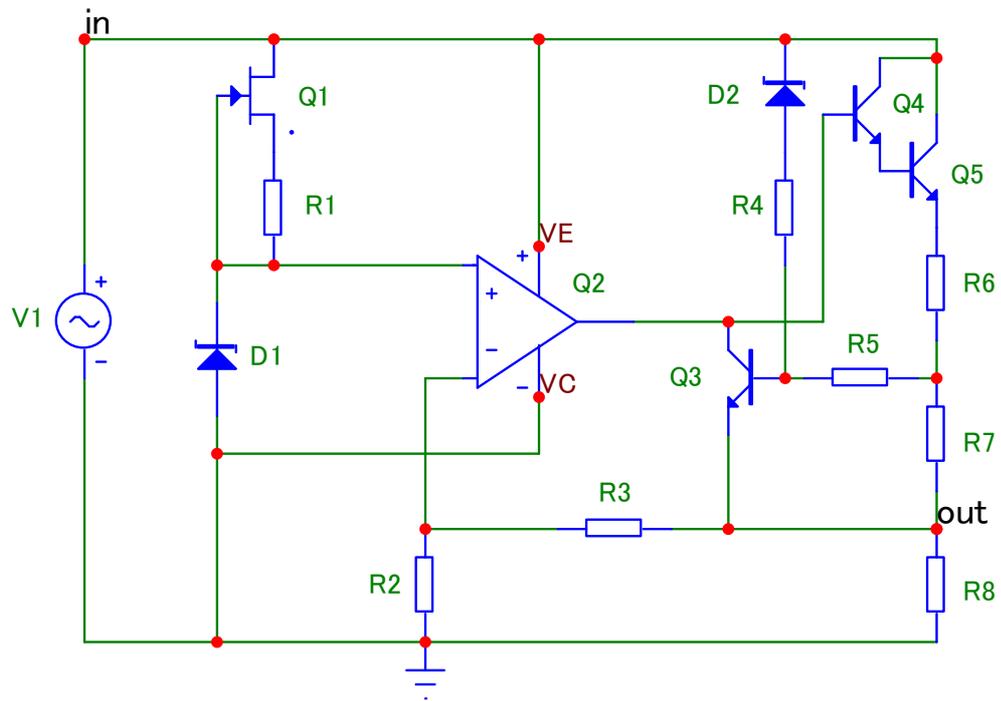


Рисунок 3.3. Схема электрическая принципиальная стабилизатора напряжения

Таблица 3.1.

Электрические параметры стабилизатора напряжения	Номинальные значения
Коэффициент стабилизации, $\Delta U_{вх} / \Delta U_{вых}$	$2500 \pm 5\%$
Выходное стабилизированное напряжение, В	$10 \pm 5\%$
Максимальный выходной ток, А	$0,5 \pm 5\%$

Процесс тепломассопереноса рассматривался в двухслойной («металл–полимер») пластине с локальным дефектом (трещиной), (рис. 2.1).

Проводник нагревался за счет движения электронов. Рост температуры способствовал увеличению скорости окисления металла воздухом в трещине. В результате формировалась окисная пленка, которая в некоторой степени тормозила процесс подвода кислорода к поверхности чистого металла. Но при этом уменьшалась площадь поперечного сечения проводника. Соответственно изменялись условия для движения электрических зарядов в зоне окисления, т. к. окислы металлов, как правило, являются диэлектриками. Учитывалась зависимость скорости окисления металла от температуры.

Задача решена в двумерной постановке в декартовой системе координат.

Область решения включала в себя несколько элементов (зон) с отличающимися теплофизическими характеристиками и размерами – медный проводник, защитная пленка (полимер), воздушная область, пленка окисла, (рис. 2.2). На границах: тепловой контакт между элементами считался идеальным (граничные условия четвертого рода); на внешней верхней – условие третьего рода; на боковых и нижней – условия теплоизоляции.

Задача теплопереноса в рассматриваемом случае сводилась к решению нестационарных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями (2.3-2.20).

Интенсивность тепловыделения в проводнике рассчитывалась по выражению (2.3), а скорость окисления металла по формуле (2.2).

Численный анализ выполнен для типичных параметров эксплуатации современной электронной техники [74]. Температура окружающей среды изменялась от  $T_{в}=253$  до  $T_{в}=313$  К. Время эксплуатации электронного прибора 4 года. Поперечное сечение проводника прямоугольное со сторонами  $z=0,6$  мм;  $d+h=0,2$  мм;  $L_x=0,4$  мм;  $L_y=0,4$  мм. Ширина зоны дефекта  $b=40$  мкм. Проводник нагревался под действием начального тока  $I=0,5$  А. Численное моделирование велось на неравномерной сетке по

координатам  $x$ ,  $y$ . Шаг сетки изменялся от некоторого минимального значения  $h_{\min}$  в геометрической прогрессии. Таким образом, 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/(м<sup>2</sup>·К). Теплофизические характеристики материалов зон области решения приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Теплофизические характеристики материалов [76]

№ области	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1	380	8930	385
2	2000	1500	0,8
3	1006	1,275	0,0257
4	420	4700	150

Типичные распределения температур в проводнике транзистора с дефектом корпуса прибора представлены на рис. 3.4, 3.5.

Представленные иллюстрации показывают, что в целом температурные поля являются почти однородными. Перепад температур по области решения составляет не более 0,4 К. Объясняется это малыми линейными размерами области решения и высокой теплопроводностью металла.

Зависимость температуры проводника от времени эксплуатации прибора при различных внешних условиях представлена на рис. 3.6.

Увеличение коэффициента конвективного теплообмена боковой поверхности тела с окружающей средой от  $\alpha=1$  до 4 Вт/(м<sup>2</sup>·К) приводит к адекватному снижению температуры области решения.

Возрастание температуры с ростом  $t$  обусловлено изменением площади поперечного сечения проводника. Это связано с возрастанием сопротивления проводника по мере увеличения температуры и, как следствие, увеличения мощности тепловыделения.

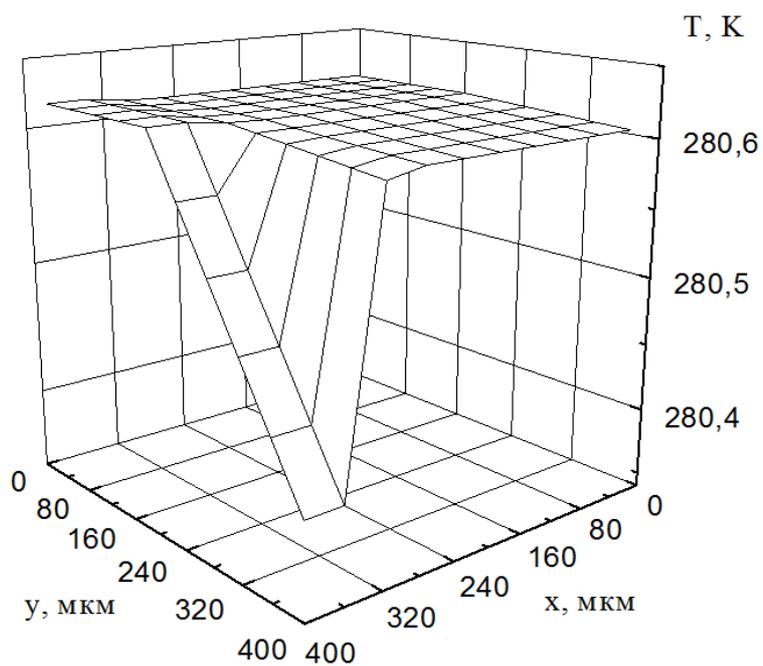


Рисунок 3.4. Поле температур в проводнике транзистора с дефектом защитного покрытия при  $t=10$  тыс. ч.,  $T_B=253$  К,  $\alpha=1$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

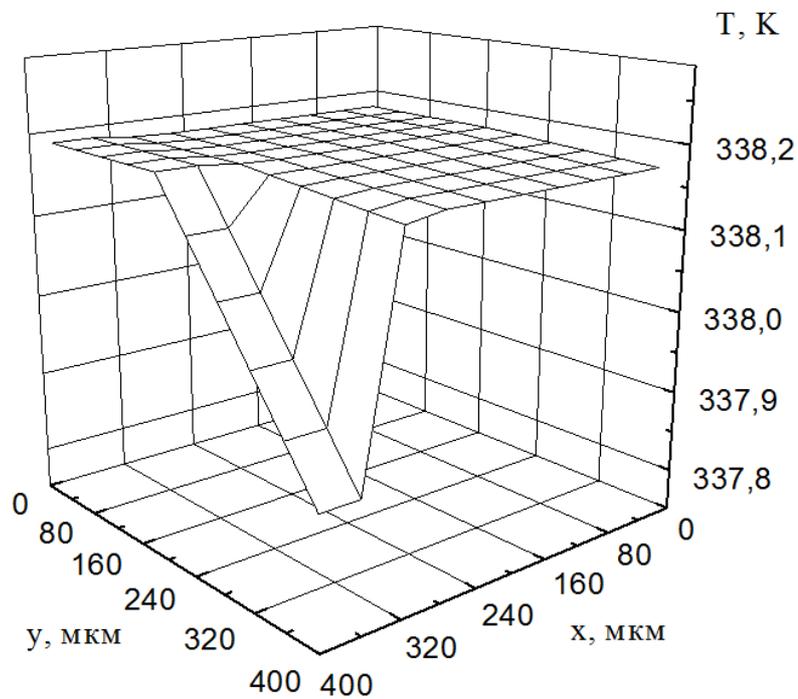


Рисунок 3.5. Поле температур в проводнике транзистора с дефектом защитного покрытия при  $t=10$  тыс. ч.,  $T_B=300$  К,  $\alpha=1$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

Зависимость температуры проводника от времени работы прибора при различных значениях температуры окружающей среды в условиях слабого охлаждения представлена на рис. 3.6 и 3.7. Например, при  $T_{\text{в}}=253$  К и  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) типичная эксплуатационная температура исправного электронного прибора соответствует  $T=280$  К рис. 3.7. Процесс окисления металла в данном режиме эксплуатации РЭО приводит к возрастанию температуры электронного прибора на  $\Delta T=1$  К. Однако с ростом температуры окружающей среды в дефектном ППП растет и скорость окисления металла, а это приводит к более заметному увеличению температуры эксплуатации РЭО. Так, например, при возможной температуре воздуха  $T_{\text{в}}=313$  К (в корпусе бортового РЭО [24]) и  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) типичная эксплуатационная температура исправного электронного прибора соответствует  $T=332$  К рис. 3.7. Процесс окисления металла в данном режиме эксплуатации РЭО приводит к росту температуры электронного прибора на  $\Delta T=12$  К.

Перепады температур внешней среды например от  $T_{\text{в}}=253$  К до  $T_{\text{в}}=313$  К приводят к адекватному возрастанию температуры области решения на соответствующую величину (рис. 3.7).

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. При анализе температурных полей металлических элементов электронных приборов в определенном диапазоне температур окружающей среды в первом приближении достаточно использовать результаты вычислений значений температуры для известной величины  $T_{\text{в}}$ . При переходе к другим значениям температуры внешней среды  $T_{\text{в}}^1$  достаточно изменить температуру в каждой точки узла на  $\Delta T = |T_{\text{в}}^1 - T_{\text{в}}|$ . Как показал численный анализ, такой прием при отсутствии условий для проведения полномасштабных длительных вычислений с использованием двумерной модели теплопереноса является вполне приемлемым.

Зависимость температуры проводника исправного РЭО от времени его работы при различных значениях температуры окружающей среды в

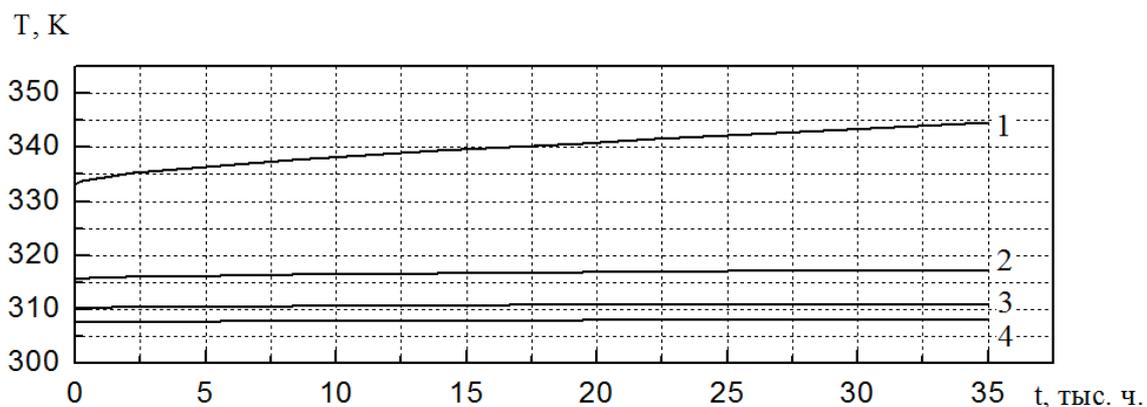


Рисунок 3.6. Зависимость температуры проводника транзистора с дефектом защитного покрытия от времени при  $T_B=300$  К;  
 1 –  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $\alpha=2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 3 –  $\alpha=3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 4 –  $\alpha=4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

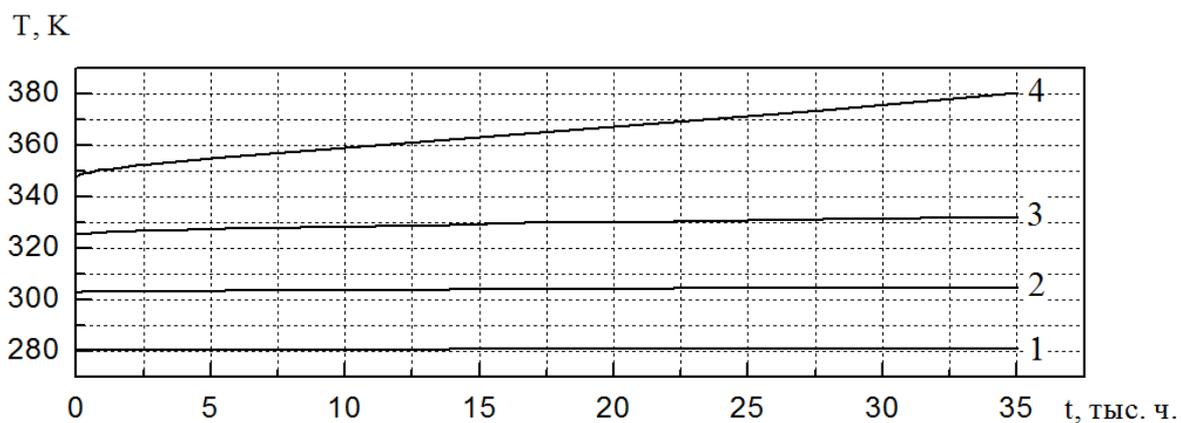


Рисунок 3.7. Зависимость температуры проводника транзистора с дефектом защитного покрытия от времени при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 1 –  $T_B=253$  К; 2 –  $T_B=273$  К; 3 –  $T_B=293$  К; 4 –  $T_B=313$  К

условиях умеренного охлаждения представлена на рис. 3.8.

Как и следовало ожидать эксплуатационные температуры электронного прибора (рис. 3.7 и 3.8) 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 интенсивному тепловыделению. Также следует заметить, что повышение эксплуатационной температуры электронного прибора на 10 градусов снижает его надежность (увеличивается интенсивность отказов) в два раза [7].

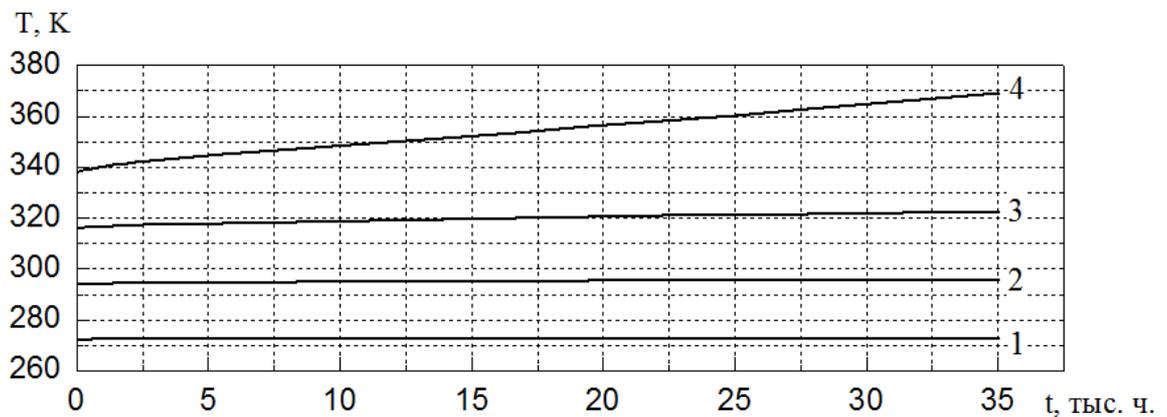


Рисунок 3.8. Зависимость температуры проводника исправного транзистора от времени при  $\alpha=1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 1 –  $T_{\text{в}}=253 \text{ К}$ ; 2 –  $T_{\text{в}}=273 \text{ К}$ ; 3 –  $T_{\text{в}}=293 \text{ К}$ ; 4 –  $T_{\text{в}}=313 \text{ К}$

Скорость окисления металла рассчитывалась при численном моделировании тепломассопереноса в проводнике. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени эксплуатации при различных значениях температуры окружающей среды представлены на рис. 3.9.

На рис. 3.10. приведена зависимость роста оксидной пленки от времени при различных коэффициентах конвективной теплоотдачи.

По результатам численных исследований установлено, что по мере роста слоя окисла металла (рис. 3.9) растет интенсивность разогрева проводника, температура (рис. 3.5) 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. Заметный рост толщины оксидной пленки металла наблюдается при увеличении температуры проводника. Так, например повышение температуры окружающей среды на 60 К приводит к увеличению толщины оксидной пленки на металле (рис. 3.9) в 30 раз при  $t=35$  тыс. часов. Это может существенно повлиять на надежность и режимы работы электронных схем.

Полученные зависимости температуры проводника от времени эксплуатации электронного прибора использовались для расчета показателя надежности  $\mu(t)$  РЭО с помощью модели Аррениуса (1.2) [25]. Также рассчитывались  $\mu(t)$  исправных электронных приборов (без повреждения защитного изоляционного слоя).

На рис. 3.10 и 3.11 приведены зависимости этой характеристики надежности электронного прибора от времени при различных условиях эксплуатации. Видно, например, что уменьшение коэффициента  $\alpha$  от 4 до 1 Вт/(м<sup>2</sup>·К) при температуре внешней среды  $T_b=300$  К приводит к увеличению интенсивности отказов РЭО с дефектным ППП в десять раз рис. 3.10. При слабом конвективном теплообмене электронного прибора с окружающей средой и росте температуры  $T_b$  от 253 до 313 К значение  $\mu$  РЭО может увеличиваться в тысячу раз и более при окислении металла ППП рис. 3.10.

В результате численных исследований установлено, например, что длительная эксплуатация транзистора при  $T_b=313$  К,  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (при условии локального растрескивания защитной пленки) может привести к существенному снижению надежности радиоэлектронного оборудования, частью которого этот транзистор является.

С помощью численных исследований возможно устанавливать время до отказа электронного прибора. Время отказа это время когда металл полностью окислится в зоне трещины изоляции. А этот процесс можно контролировать по зависимостям рис. 3.9, 3.10.

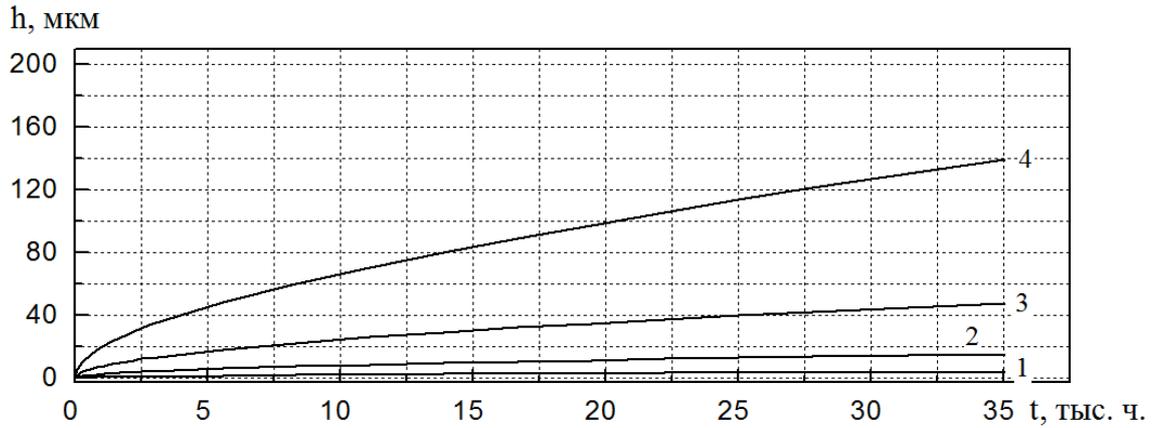


Рисунок 3.9. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени при  $\alpha = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 1 –  $T_b = 253 \text{ К}$ ; 2 –  $T_b = 273 \text{ К}$ ; 3 –  $T_b = 293 \text{ К}$ ; 4 –  $T_b = 313 \text{ К}$

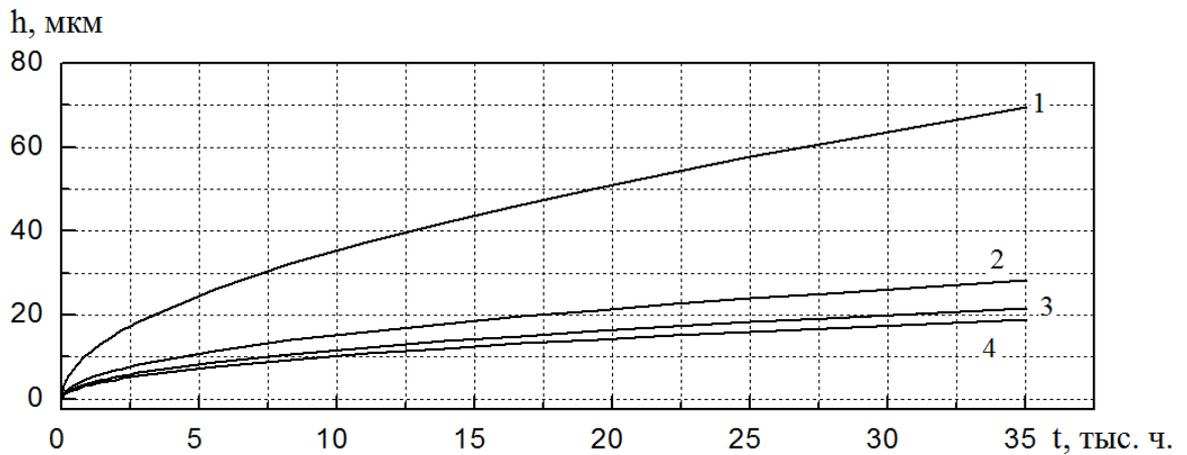


Рисунок 3.10. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени при  $T_b = 300 \text{ К}$ ; 1 –  $\alpha = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 2 –  $\alpha = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 3 –  $\alpha = 3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 4 –  $\alpha = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

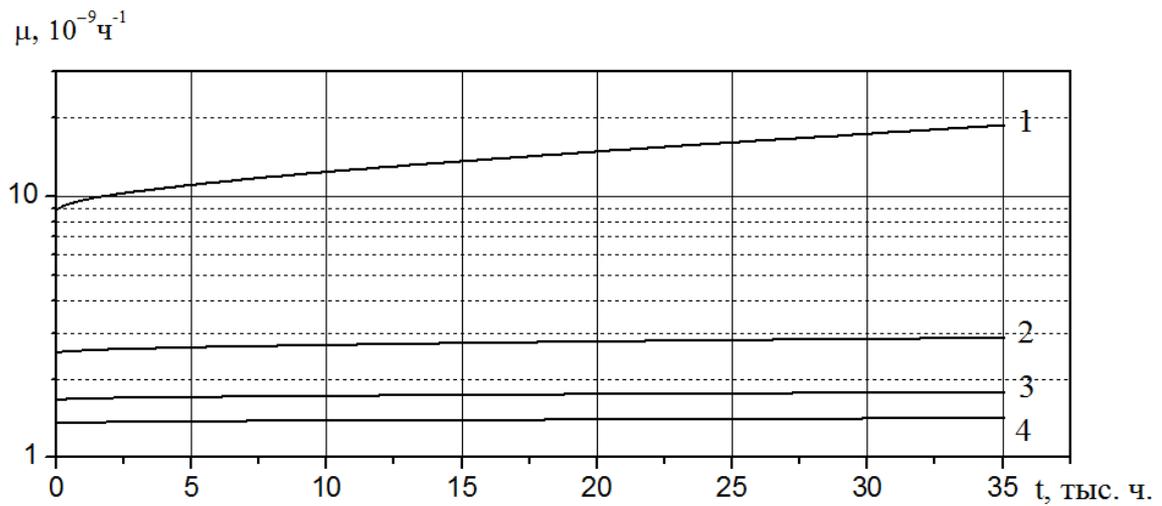


Рисунок 3.11. Изменение во времени интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике при  $T_B=300$  К;  $1 - \alpha=1$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $2 - \alpha=2$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $3 - \alpha=3$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $4 - \alpha=4$  Вт/( $m^2 \cdot K$ )

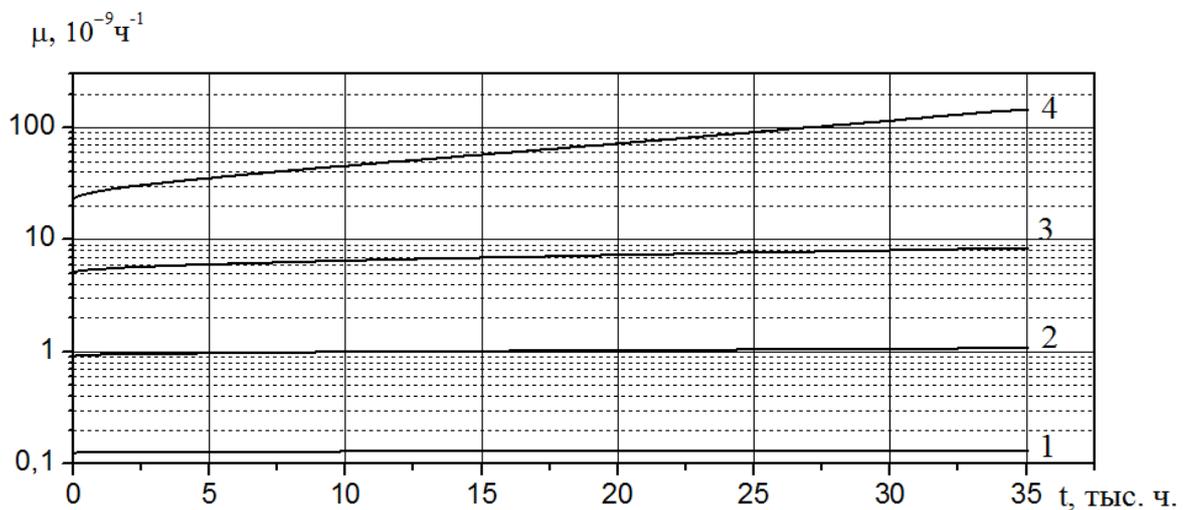


Рисунок 3.12. Изменение во времени интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике при  $\alpha=1$  Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $1 - T_B=253$  К;  $2 - T_B=273$  К;  $3 - T_B=293$  К;  $4 - T_B=313$  К

Самым неблагоприятным режимом работы электронного прибора является режим при  $T_{\text{в}}=313 \text{ К}$ ,  $\alpha = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . В этом случае конвективный тепловой поток от проводника в окружающую среду минимален, а температура окружающей среды максимальна. В результате температура транзистора возрастает, а площадь поперечного сечения проводника из-за процессов интенсивного окисления уменьшается. Толщина оксидной пленки достигает  $h=140 \text{ мкм}$  рис. 3.9, а температура проводника  $380 \text{ К}$ . Силовые электронные приборы крепятся на радиаторы, для обеспечения принудительного охлаждения и эффективного отвода тепла. Однако крепление транзисторов к радиаторам обеспечивается со стороны металлической подложки, в то время как остальные стороны пластмассового корпуса с ним в большинстве случаев не контактируют.

Уменьшение площади поперечного сечения проводника, приводит также к росту его омического сопротивления  $R(T_1)$ , которое соответственно может существенно влиять на работу и параметры электронного прибора.

Из рис.3.11 видно, что процесс окисления металла дефектного ППП может увеличивать интенсивность отказов  $\mu$  электронного прибора и РЭО в целом в тысячи и более раз [25]. Дальнейшая эксплуатация РЭО с предельными рабочими температурами рис. 3.7 может привести к полному окислению проводника, что вызовет отказ электронного прибора рис. 3.9. Эксплуатация электронного прибора с температурой ППП равной  $380 \text{ К}$  и более может вызвать существенное сокращение его срока службы или параметрический отказ [25].

На рис. 3.13 и 3.14 приведены зависимости интенсивности отказов исправного 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.

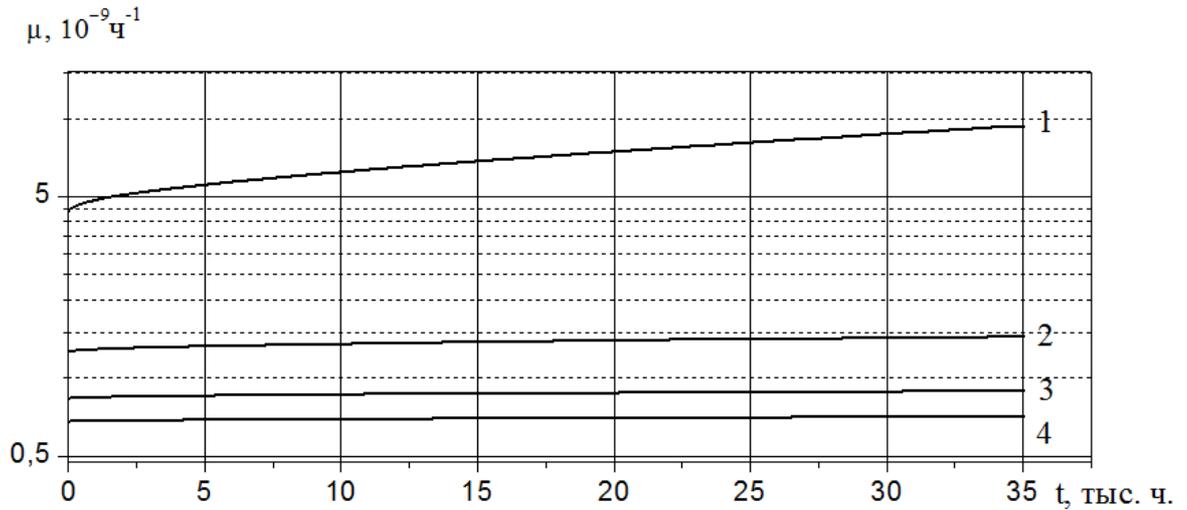


Рисунок 3.13. Изменение во времени при интенсивном теплопереносе в РТМ интенсивности отказов исправного электронного прибора ( $T_{в}=300$  К; 1 –  $\alpha=1$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); 2 –  $\alpha=2$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); 3 –  $\alpha=3$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); 4 –  $\alpha=4$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ))

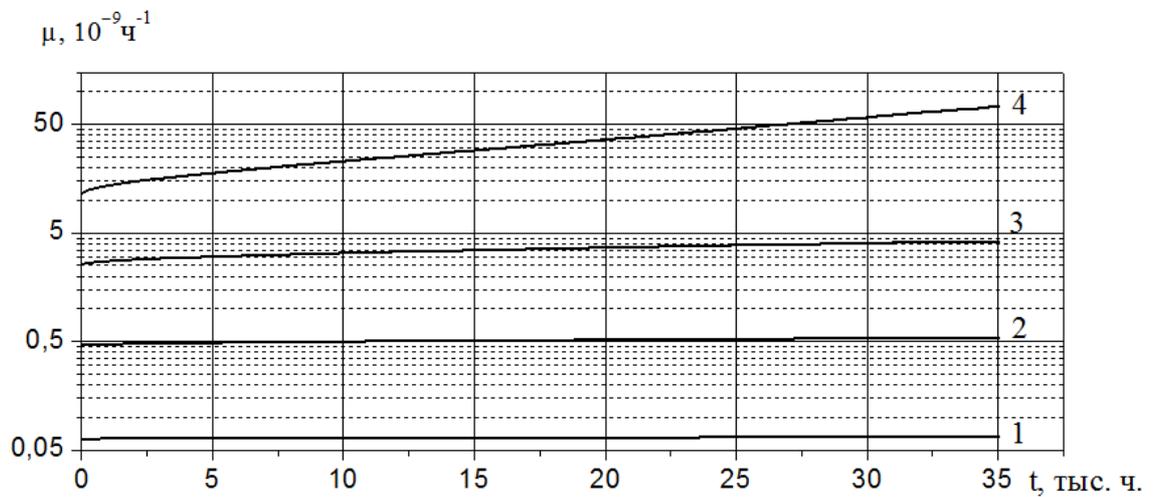


Рисунок 3.14. Изменение во времени при интенсивном теплопереносе в РТМ интенсивности отказов исправного электронного прибора ( $\alpha=1$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ); 1 –  $T_{в}=253$  К; 2 –  $T_{в}=273$  К; 3 –  $T_{в}=293$  К; 4 –  $T_{в}=313$  К).

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 снижению характеристик надежности или отказу РЭО.

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

Масштабы выделенного эффекта при эксплуатации полупроводниковых приборов определяются временем их работы в неблагоприятных условиях (климатические факторы, повышенные температуры).

Полученные результаты являются основанием для объективной оценки ухудшения характеристик полупроводниковых приборов 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 полупроводниковых приборов при работе и в других окислительных средах.

### **3.2 Влияние окисления медного проводника круглого сечения на параметры, характеризующие надежность электронной схемы**

Объектом исследования был медный проводник из схемы достаточно типичного широкополосного усилителя на базе ИС К175УВ1А [74]. Схема электрическая принципиальная усилителя представлена на рис. 3.12. Электрические характеристики микросхемы представлены в табл. 3.3.

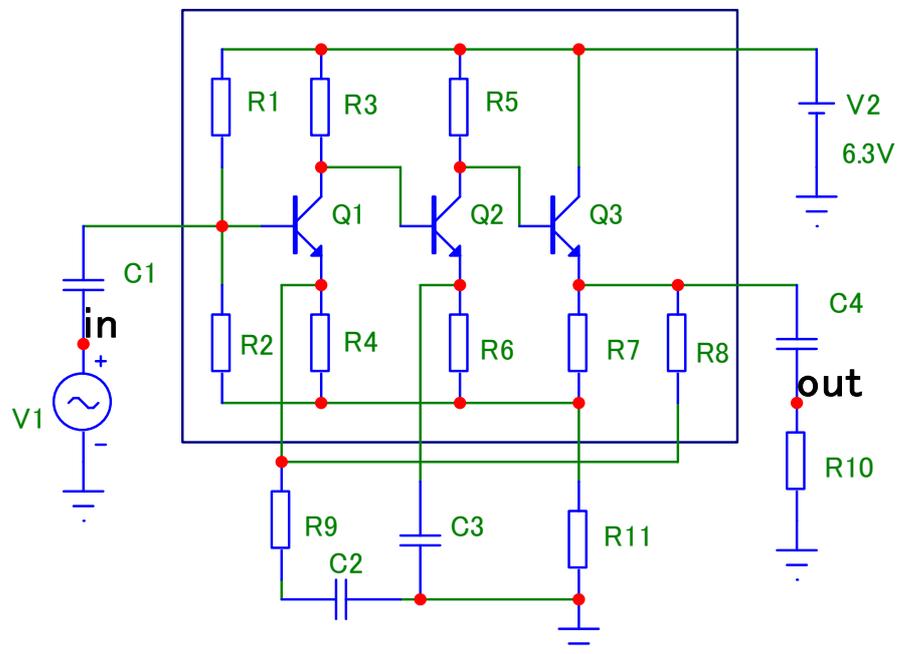


Рисунок 3.12. Схема электрическая принципиальная широкополосного усилителя на базе ИС К175УВ1А

Таблица 3.3

Электрические характеристики ИС К175УВ1А	Номинальное значение
Коэффициент усиления по напряжению, дБ при $U_{вх}=10$ мВ, $f_{вх}=1$ МГц	не менее 10

Работа электронной схемы моделировалась в схемотехнической программе Micro-Cap 8 [75].

Ставилась задача оценить влияние процесса окисления металлического проводника микросхемы на изменение характеристик надежности электронного прибора.

Для оценки масштабов влияния окисления рассматривалась задача о температурном поле в сечении круглого медного проводника, покрытого изоляцией (рис. 2.4). В зоне изоляции был локальный дефект (трещина).

Проводник нагревался за счет движения электронов. При повышении температуры ускорялся процесс окисления металла. Образовавшийся оксидный слой изменял условия подвода кислорода к поверхности металла. Также изменялись условия для движения электрических зарядов в зоне окисления.

Задача решена в двумерной постановке в цилиндрической системе координат.

Область решения (рис. 2.5) включает в себя несколько зон с отличающимися теплофизическими характеристиками и размерами. На границах: между зонами предполагается идеальный тепловой контакт и заданы граничные условия четвертого рода; на внешней – условие третьего рода.

Задача сводится к решению нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности (2.42, 2.43) с соответствующими начальными (2.45) и нелинейными граничными условиями (2.46-2.55).

Интенсивность тепловыделения в проводнике рассчитывалась по выражению (2.4), скорость химической реакции по формуле (2.2).

Численный анализ выполнен при следующих исходных данных:  $L_r=60$  мкм;  $d+h=30$  мкм;  $\varphi_1=45^\circ$ ;  $d\varphi=36^\circ$ . Проводник нагревался под действием тока  $I=10$  мА, который рассчитывался с использованием пакета схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 [75]. Численное моделирование велось на неравномерной сетке размерами  $40 \times 60$  по

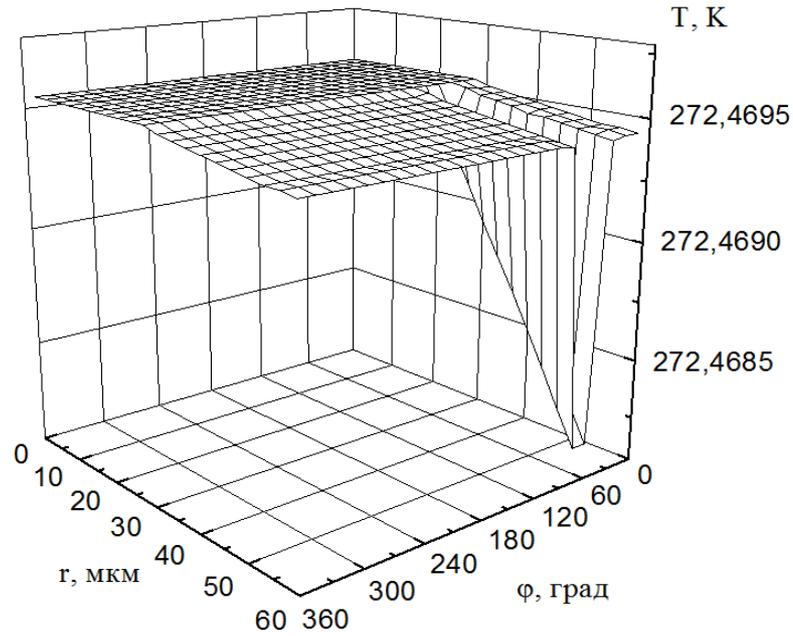


Рисунок 3.15. Распределение температуры в сечении проводника в момент времени  $t=4$  года, при  $T_b=253$  К,  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) с дефектом защитного покрытия

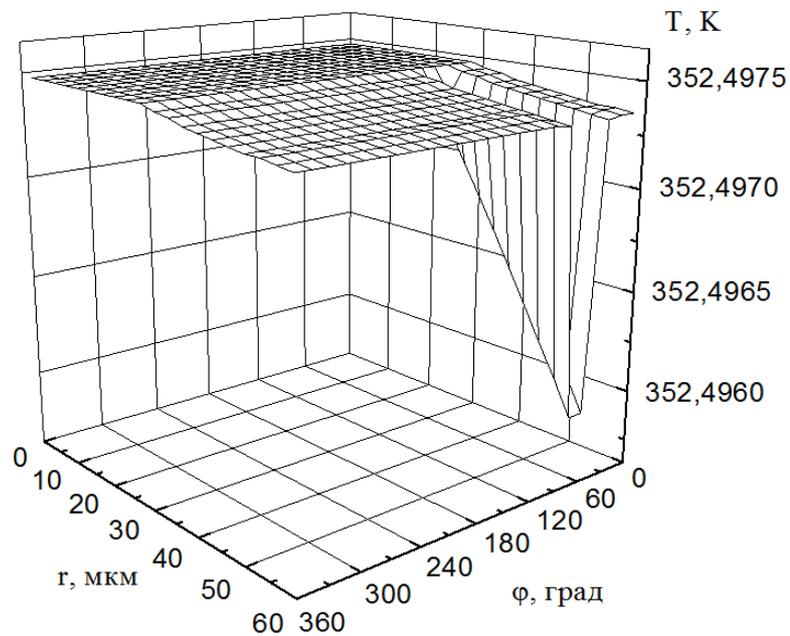


Рисунок 3.16. Распределение температуры в сечении проводника в момент времени  $t=4$  года, при  $T_b=313$  К,  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) с дефектом защитного покрытия

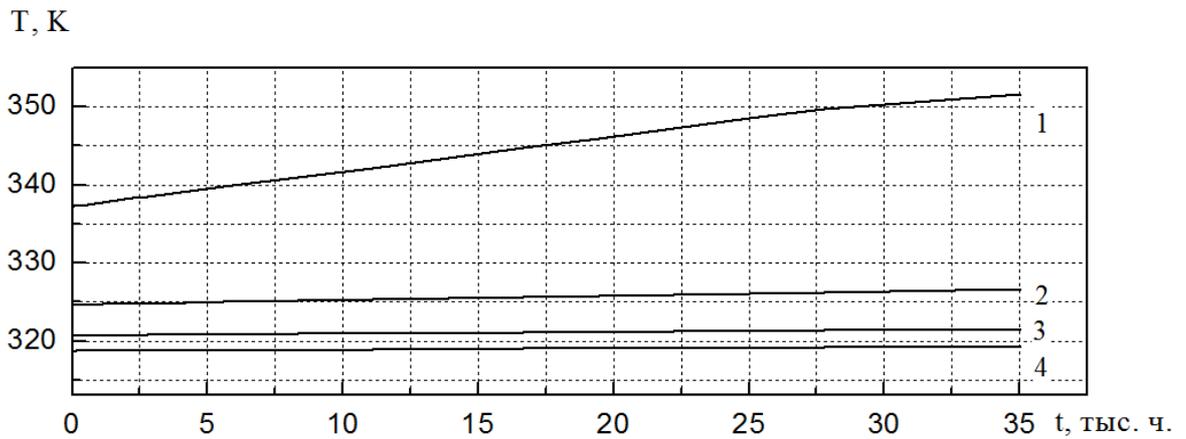


Рисунок 3.17. Зависимость температуры проводника электронной схемы с дефектом защитного покрытия от времени при  $T_B=313$  К; 1 –  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $\alpha=2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 3 –  $\alpha=3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 4 –  $\alpha=4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

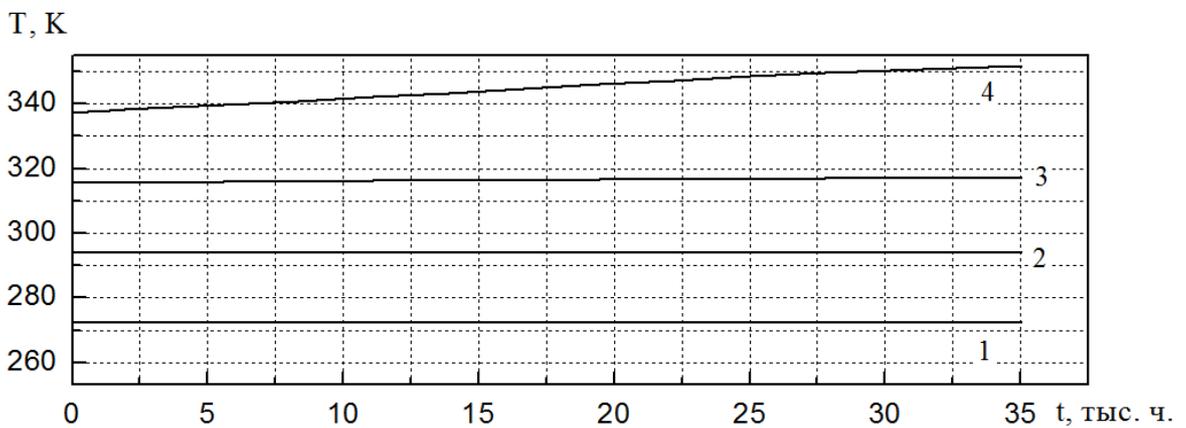


Рисунок 3.18. Зависимость температуры проводника электронной схемы с дефектом защитного покрытия от времени при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 1 –  $T_B=253$  К; 2 –  $T_B=273$  К; 3 –  $T_B=293$  К; 4 –  $T_B=313$  К

Таблица 3.4. Теплофизические характеристики материалов [76]

№ области	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1	380	8930	385
2	420	4700	150
3	1006	1,275	0,0257

координатам  $r$  и  $\varphi$  соответственно, шаг по времени составлял до 1 мс. Шаг сетки по координате  $r$  изменялся от минимального значения  $h_{\min}=60 \cdot 10^{-12}$  м в геометрической прогрессии. Сетка сгущалась на границах между зонами. Начальная температура принималась равной температуре окружающей среды  $T_b$ , которая варьировалась от 253 до 313 К, а коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha$  изменялся от 1 до 4 Вт/(м<sup>2</sup>·К) [7]. Теплофизические характеристики материалов зон области решения приведены в табл. 3.4.

На рис. 3.15, 3.16 представлены типичные распределения температуры в сечении проводника с дефектом изоляции в момент времени  $t=4$  года при токе в проводнике  $I=10$  мА,  $T_b=253, 313$  К,  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Типичные зависимости температуры проводника от времени эксплуатации электронной схемы представлены на рис. 3.17, 3.18. Кривые показывают, как изменяется температура проводника во времени при изменении условий окружающей среды.

На рис. 3.19, 3.20 представлены зависимости толщины пленки окисла металла от времени при изменении температуры окружающей среды и коэффициента конвективной теплоотдачи.

Заметный рост толщины оксидной пленки металла происходит при увеличении температуры проводника. Так, например повышение температуры окружающей среды на 60 К приводит к увеличению толщины оксидной пленки на металле (рис. 3.19) в 16 раз при  $t=35$  тыс. часов. Этот эффект может существенно повлиять на надежность и режимы работы электронных схем.

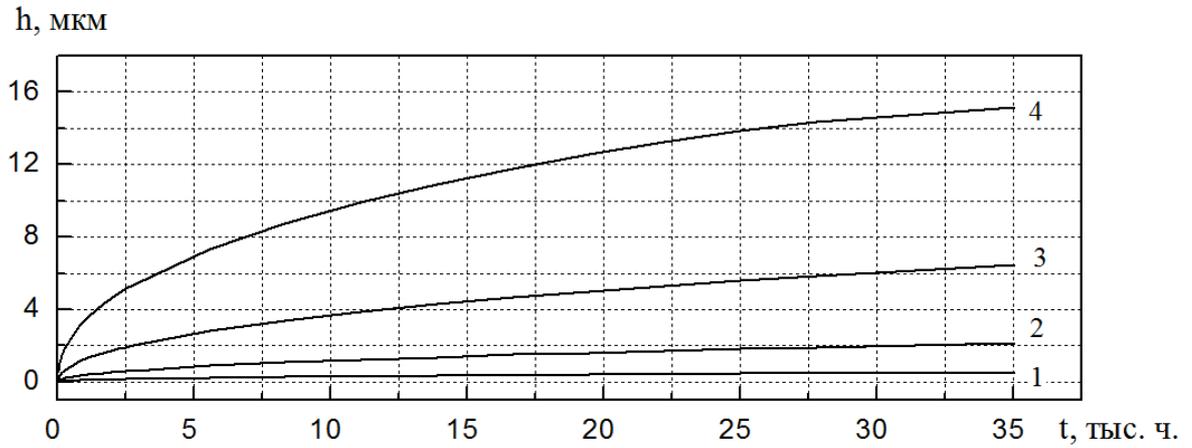


Рисунок 3.19. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени при  $\alpha=1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 1 –  $T_b=253 \text{ К}$ ; 2 –  $T_b=273 \text{ К}$ ; 3 –  $T_b=293 \text{ К}$ ; 4 –  $T_b=313 \text{ К}$

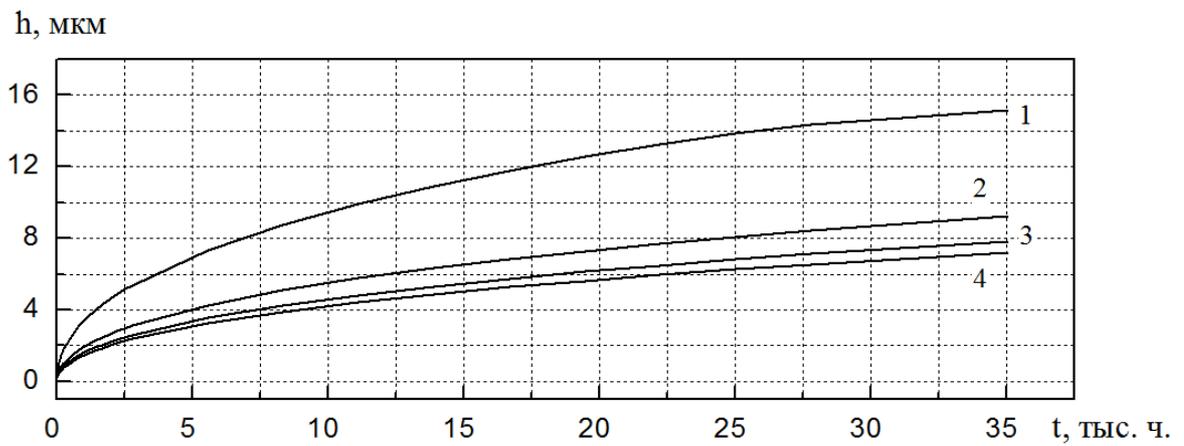


Рисунок 3.20. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени при  $T_b=313 \text{ К}$ ; 1 –  $\alpha=1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 2 –  $\alpha=2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 3 –  $\alpha=3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 4 –  $\alpha=4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

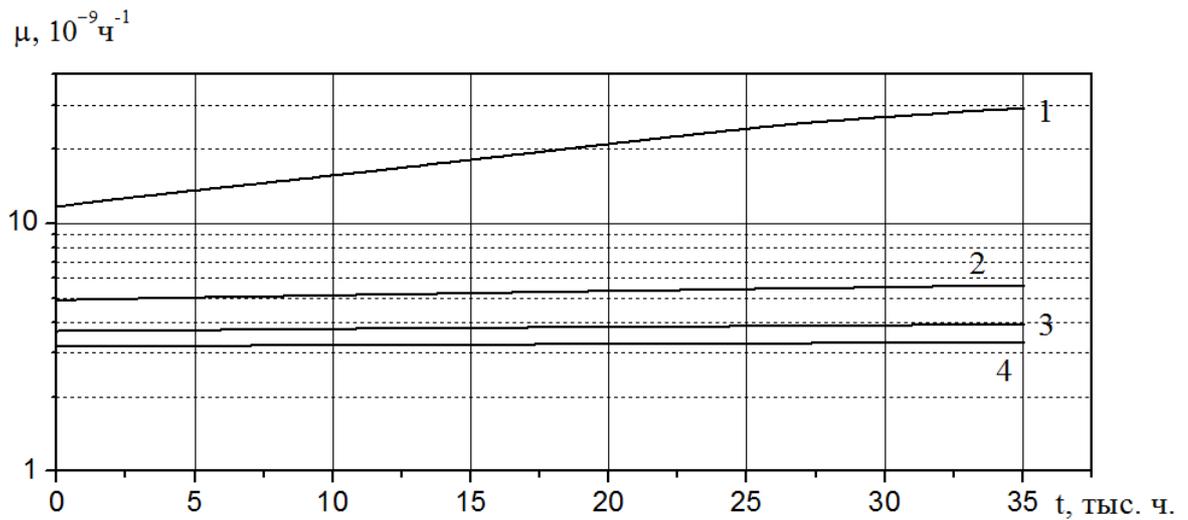


Рисунок 3.21. Изменение во времени интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике при  $T_b=313$  К;  
 1 –  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $\alpha=2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 3 –  $\alpha=3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 4 –  $\alpha=4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

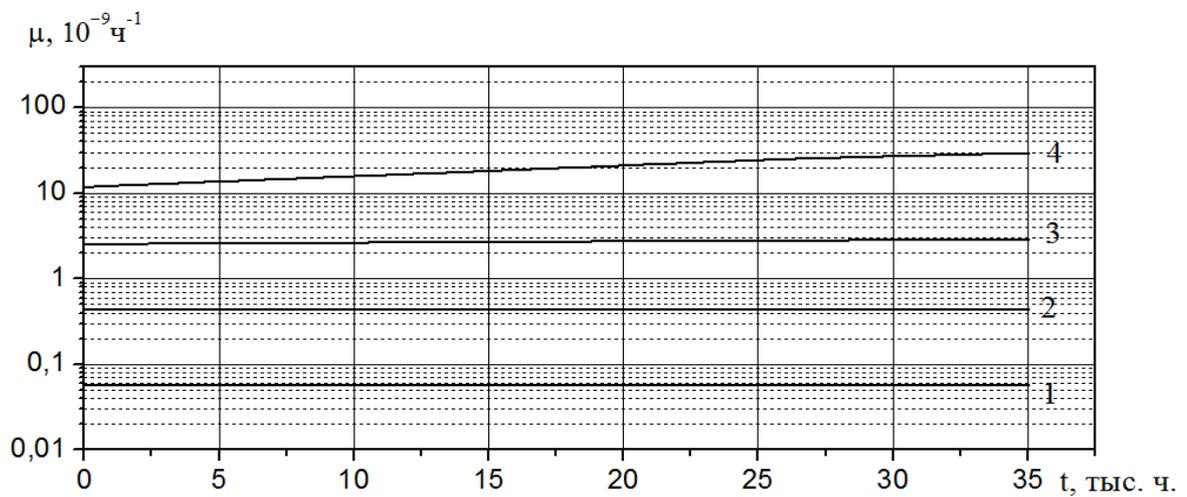


Рисунок 3.22. Изменение во времени интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 1 –  $T_b=253$  К; 2 –  $T_b=273$  К; 3 –  $T_b=293$  К; 4 –  $T_b=313$  К

Полученные зависимости температуры проводника от времени эксплуатации электронного прибора использовались для расчета показателя надежности  $\mu(t)$  РЭО с помощью модели Аррениуса (2.1) [25].

На рис. 3.21 и 3.22 приведены зависимости интенсивности отказов рассматриваемого электронного прибора от времени при различных условиях эксплуатации. Видно, например, что уменьшение коэффициента  $\alpha$  от 4 до 1 Вт/(м<sup>2</sup>·К) при температуре внешней среды  $T_{в}=313$  К приводит к снижению этих характеристик надежности РЭО с дефектным ППП в десять раз рис. 3.21. При слабом конвективном теплообмене электронного прибора с окружающей средой и росте температуры  $T_{в}$  от 253 до 313 К надежность РЭО может снижаться в 200 раз и более при окислении металла ППП (рис. 3.22).

В результате численных исследований установлено, например, что при эксплуатации электронного узла (при локальном растрескивании изоляции) вероятность снижения надежности РЭО тем больше чем больше  $d\varphi$ ,  $h$ ,  $t$ . Кроме того, в микросхеме могут одновременно окисляться и другие соединительные проводники, что может повлечь за собой отказ РЭО за более короткий срок эксплуатации.

Полученный результат показывает перспективность разработанной методики прогнозирования параметрической надежности электронных схем.

На основании результатов математического моделирования процессов тепломассопереноса в системе «проводник – слой окисла – воздушный слой – окружающая среда» можно сделать вывод, что окисление токопроводящих элементов может приводить к заметному снижению надежности типовых приборов. Масштабы выделенного эффекта при эксплуатации приборов определяются поперечным размером проводников, подвергшихся коррозии, величинами токов в проводниках и временем их работы. Поэтому при оценке надежности радиоэлектронных приборов необходимо учитывать скорость окисления проводников в реальных условиях эксплуатации и определять

оптимальные требования к контролю герметичности корпусов таких приборов.

### **3.3 Численное моделирование влияния окисления алюминиевой металлизации кислородом на надежность интегральной схемы**

Выше было показано, как влияет процесс окисления проводников электронного прибора в условиях роста его температуры на изменение физических свойств медных элементов и характеристик надежности широкополосного усилителя.

Проведен анализ работы интегральной схемы К174УНЗ [46] и оценка изменения ее характеристик надежности при развитии процессов окисления в металлизации. Такие типичные ИС применяются в бытовой радиоаппаратуре в качестве усилителей мощности звуковых колебаний. Общий вид микросхемы показан на рис. 3. 23.

Интегральная схема К174УНЗ – предварительный усилитель звуковой частоты, используется в качестве микрофонных и телефонных усилителей в радиоприемной аппаратуре, а также для усиления слабых сигналов [46].

Схема включения микросхемы представлена на рис. 3.24.

Параметры работы микросхемы рассматривались с применением пакета схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 [75].

Усилители сигналов характеризуются определенными параметрами и характеристиками. Основные характеристики ИС приведены в табл. 3.5 и 3.6 [46].

При постановке задачи рассматривался достаточно типичный для практики случай – образование в полимерном защитном покрытии проводника ИС микротрещины. Такие трещины, как правило, трудно обнаружить при поверхностном осмотре, но их размеры достаточны для проникновения воздуха к поверхности металлического проводника. Скорость подвода окислителя при этом невелика, но при длительной работе ИС

окислительные процессы становятся значимыми. Анализ известных закономерностей процессов, протекающих в ИС при нарушении их изоляции [33-38] показывает, что при прогнозировании окисления металлов необходимо учитывать процессы диффузии окислителя и зависимость скорости окисления от температуры. Поэтому в основе постановки этой задачи должен быть, как и в вышерассмотренных, анализ температурных полей проводника. Следует отметить, что проведенные ранее [77] теоретические исследования показали целесообразность и необходимость (во многих практически важных случаях) моделирования температурных полей всех рассматривавшихся в [77] электрорадиоэлементов в нестационарной плоской или пространственной постановках. Во многом такой подход был обусловлен тем, что исследовавшиеся в [3] материалы представляли собой диэлектрические с относительно низкими коэффициентами теплопроводности. Последнее приводило к формированию в полупроводниковых приборах достаточно больших перепадов температур как в одном электрорадиоэлементе, так и между отдельными ЭРЭ.

В настоящей диссертации объектами исследования являются металлические элементы ППП. При этом теплопроводность и меди и алюминия, широко используемых для изготовления интегральных микросхем очень высока. Поэтому на первом этапе исследований представлялось целесообразным использование очень простых моделей на базе систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих температурные поля в радиоэлектронной аппаратуре в рамках подхода, разработанного еще в 70-ые годы [7]. Но проведенные численные исследования показали, что в случае формирования окисной пленки на металлизации возникает необходимость решения по крайней мере плоских (двумерных) нестационарных задач теплопроводности. Область решения в рассматриваемой задаче (также как и в вышеприведенных) была многосвязной с несколькими границами, на которых имели место разрывы всех теплофизических характеристик. Поэтому попытка использования

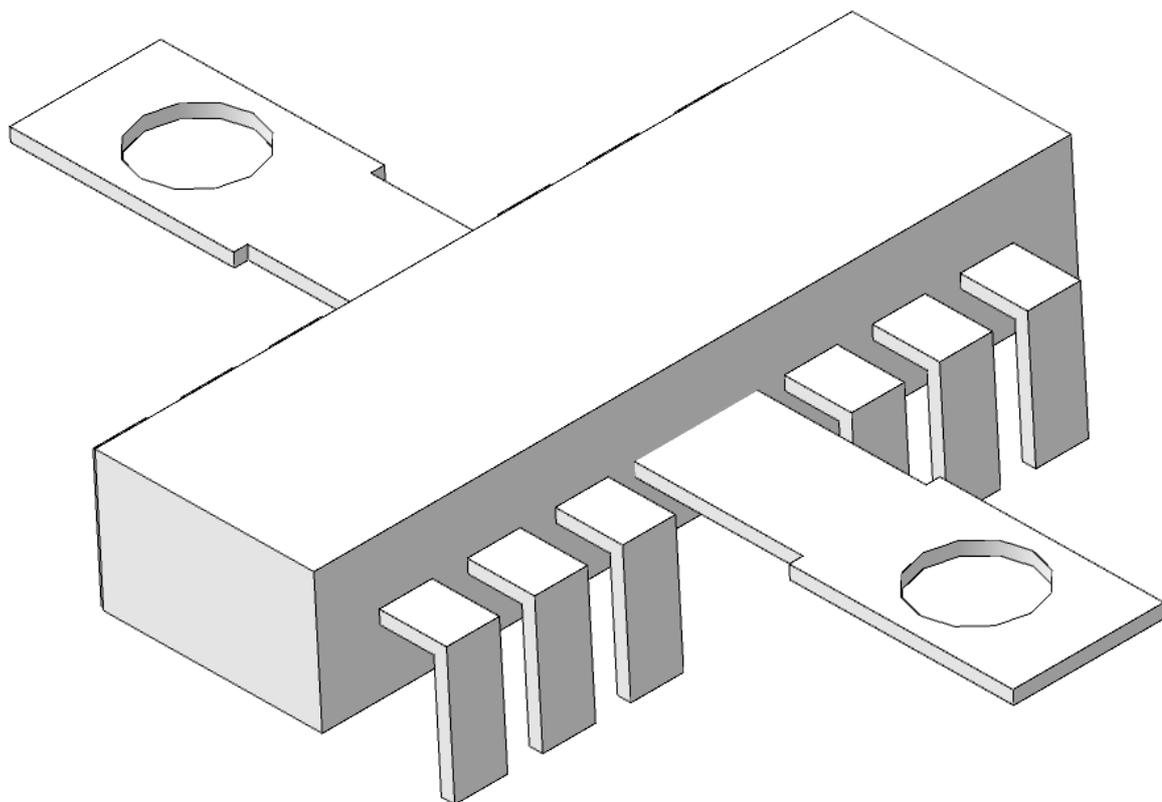


Рисунок 3.23. Общий вид ИС К174УНЗ

Таблица 3.5.

Электрические параметры ИМС К174УНЗ при $25 \pm 10^\circ \text{C}$ и $U_{и.п.ном} = 6 \text{ В}$	
Ток потребления $I_{ном}$ , мА, при $U_{вх} = 0 \text{ В}$ , не более	10
Коэффициент усиления по напряжению $K$ при $U_{вх} = 0,1 \text{ мВ}$ , $f = 1 \text{ кГц}$	600..1400
Коэффициент гармоник ( $K_г$ ), %, $U_{вх} = 0,5 \text{ В}$ , $f = 1 \text{ кГц}$ , не более	1,2
Напряжение шумов, приведенное ко входу $U_{ш.вх}$ , мкВ, в полосе 0...20 кГц и сопротивления $R_{б.О1} = 1 \text{ кОм}$ , не более	2
Входное сопротивление $R_{вх}$ , кОм, на частоте 1 кГц, не менее	10

комбинированных моделей (уравнения в частных производных для окисной пленки и обыкновенные дифференциальные для металла) была неэффективной.

Рассматривалась задача о температурном поле двухслойной пластины аналогичная представленной в разделе 3.1.

Предполагалось, что процесс диффузии кислорода протекает только по направлению  $y$  (ширина щели является малой величиной).

Область решения включает в себя несколько зон с отличающимися теплофизическими характеристиками и размерами (рис. 2.2).

Задача теплопереноса аналогично (3.1 и 3.2) сводилась к решению нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и нелинейными граничными условиями (2.3-2.20).

Скорость химической реакции по окислителю вычислялась по формуле (2.2).

При численном моделировании принималось, что интегральная схема работает непрерывно в течение четырех лет. Сечение проводника в рассматриваемой ИС было квадратным со стороной 7,5 мкм,  $L_x=15$  мкм,  $L_y=15$  мкм. Проводник нагревался под действием тока  $I=1$  мА. Численное моделирование велось на неравномерной сетке размерами  $200 \times 200$ , шаг по времени составлял до 1 мс. Шаг сетки по координатам  $x, y$  увеличивался от минимального значения  $h_{\min}=0,1 \cdot 10^{-9}$  м, в геометрической прогрессии. Сетка сгущалась на границах между зонами. Начальная температура области решения принималась равной температуре окружающей среды  $T_b=263-310$  К.

Коэффициент конвективной теплоотдачи принимался равным  $\alpha=1-4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [7].

Теплофизические характеристики зон области решения приведены в (табл. 3.7).

Таблица 3.6.

Предельные эксплуатационные параметры ИМС К174УНЗ	
Напряжение питания $U_{и.п}$ , В, не более	7
Минимальное сопротивление нагрузки $R_{и.мин}$ , кОм, не менее	10
Коэффициент усиления $K$ при температуре $-25...+55^{\circ}\text{C}$ , не менее	400

Таблица 3.7. Теплофизические характеристики материалов [76]

№ области	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1	900	2700	209,3
2	1100	2900	0.8
3	1006	1,275	0,0257
4	450	1300	105

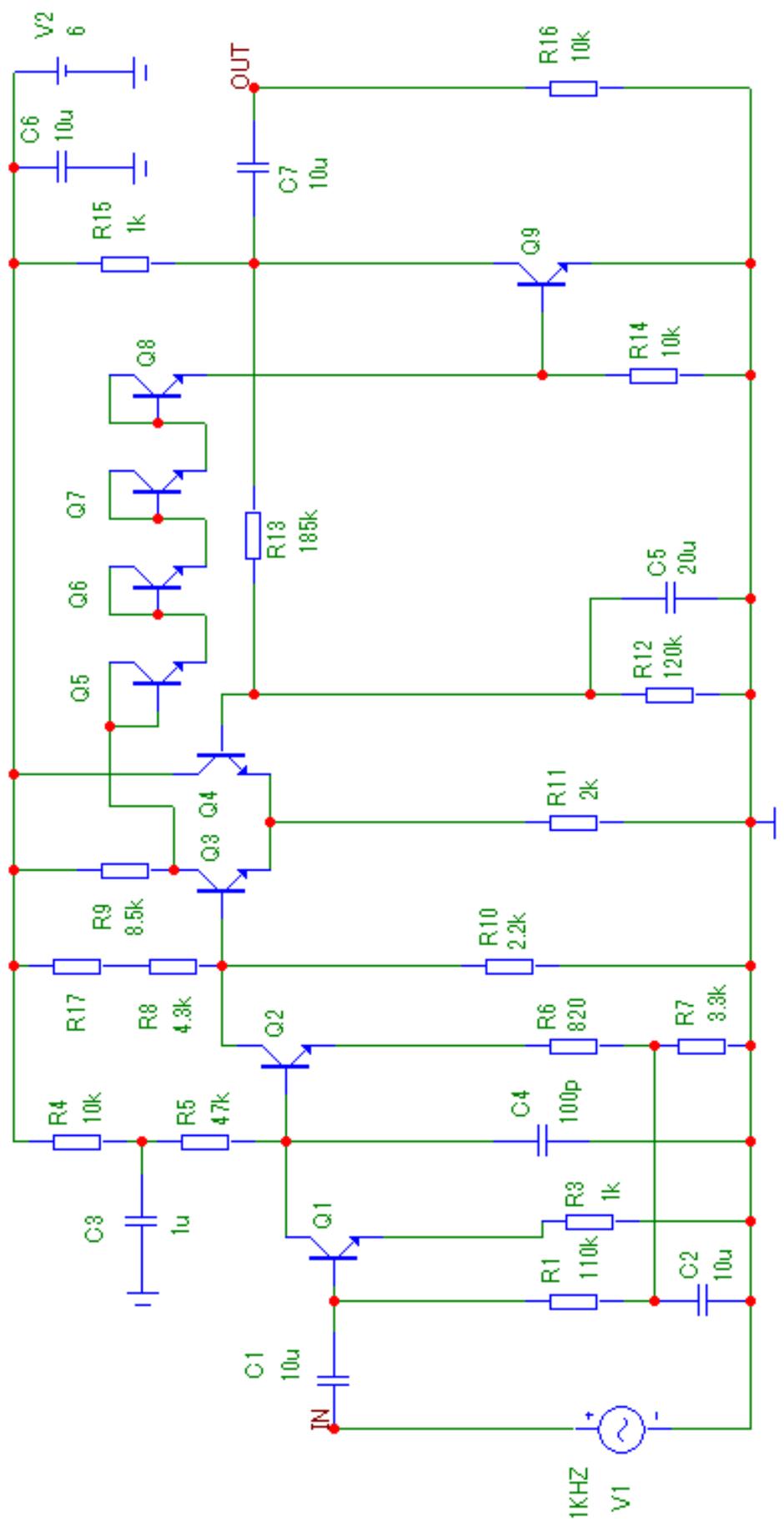


Рисунок 3.24. Схема включения и электрическая принципиальная схема ИС К174УН3

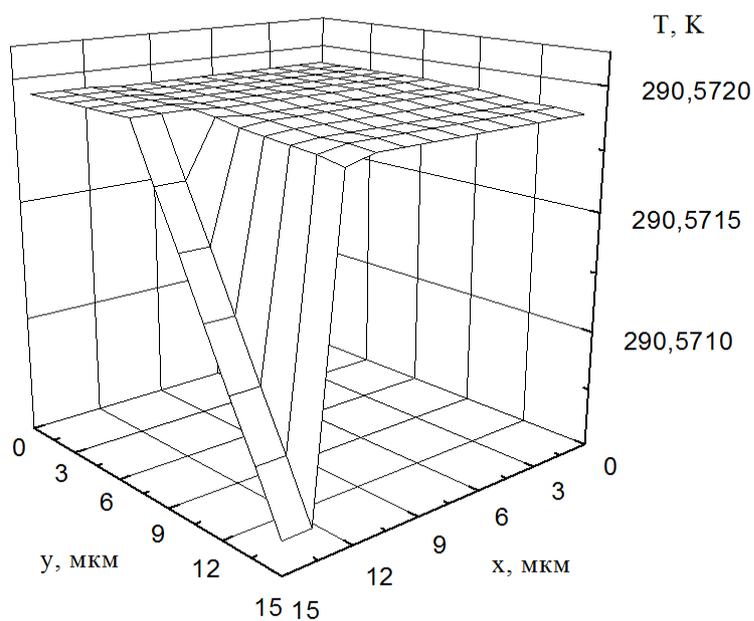


Рисунок 3.25. Поле температур в проводнике микросхемы с дефектом защитного покрытия в момент времени полного окисления проводника, при  $T_B=283$  К,  $\alpha = 1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

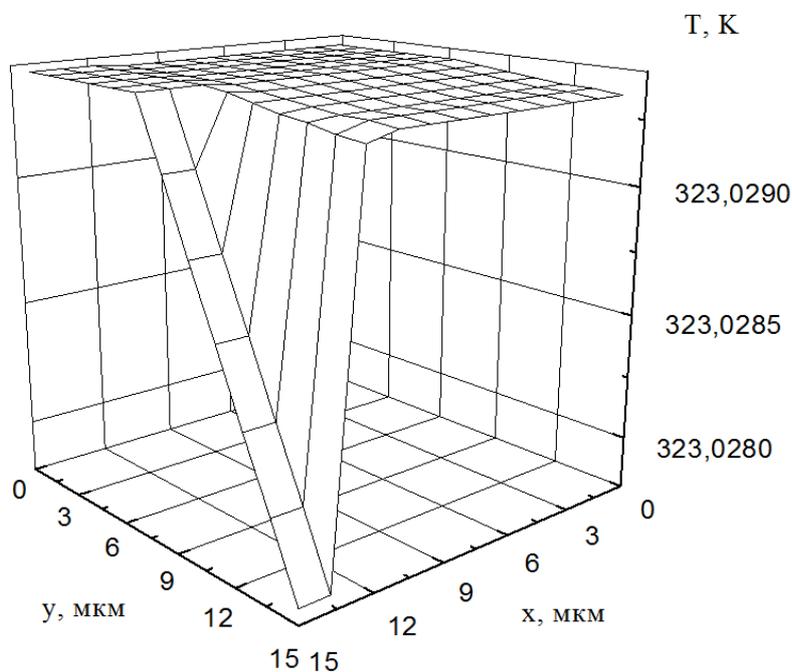


Рисунок 3.26. Поле температур в проводнике микросхемы с дефектом защитного покрытия в момент времени полного окисления проводника, при  $T_B=313$  К,  $\alpha = 1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

На рис. 3.25, 3.26 представлены типичные распределения температуры в области решения по времени.

Характер распределения температур в области решения на рис. 3.25, 3.26 схожий. Изменение условий работы электронного прибора приводит к различным значениям средней температуры области решения. Перепад температур области решения составляет не более 0,001 К. Такой перепад температур объясняется малыми линейными размерами области решения и высокой теплопроводностью металла.

В табл. 3.8, 3.9 представлены зависимости температуры проводника микросхемы от времени при различных параметрах внешней среды. При развитии процесса окисления металлизации средняя температура ИС достигает 270 К при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{в}=263$  К и 320 К при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $T_{в}=310$  К.

Зависимости толщины пленки окисла металла от времени представлена на рис. 3.27–3.28. В результате процесса окисления толщина окисла металла микросхемы составила  $h=0,4$  мкм при  $T_{в}=263$  К,  $\alpha = 1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Повышение температуры окружающей среды на 10 К приводит к увеличению толщины оксидной пленки на металле (кривые 1, 2 рис. 3.27) в два раза. Это может существенно повлиять на надежность и режимы работы электронных схем.

Полученные зависимости температуры проводника от времени эксплуатации электронного прибора использовались для расчета показателя надежности  $\mu(t)$  РЭО с помощью модели Аррениуса (2.1) [25]. В табл. 3.10 и 3.11 приведены зависимости надежности электронного прибора от времени при различных условиях эксплуатации. Видно, например, что уменьшение коэффициента  $\alpha$  от 3 до 1 Вт/(м<sup>2</sup>·К) при температуре внешней среды  $T_{в}=300$  К приводит к снижению надежности РЭО с дефектным ППП в полтора раза табл. 3.11. При слабом конвективном теплообмене электронного прибора с окружающей средой и росте температуры  $T_{в}$  от 263 до 310 К надежность

Таблица 3.8. Зависимость температуры проводника микросхемы с дефектом защитного покрытия от времени при  $T_b=300$  К; 1 –  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $\alpha=3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);

Т, К	1)	307,59	308,02	308,16	308,24	308,30	308,34	308,36	308,40
	2)	302,53	302,60	302,64	302,66	302,67	302,69	302,69	302,71
т, тыс. ч.		0	5	10	15	20	25	30	35

Таблица 3.9. Зависимость температуры проводника микросхемы с дефектом защитного покрытия от времени при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 1 –  $T_b=263$  К; 2 –  $T_b=273$  К; 3 –  $T_b=283$  К; 4 –  $T_b=310$  К

Т, К	1)	269,95	269,96	269,97	269,98	269,98	269,99	269,99	270,01
	2)	279,86	280,08	280,10	280,12	280,14	280,15	280,16	280,17
	3)	290,13	290,40	290,45	290,49	290,51	290,54	290,55	290,57
	4)	317,87	318,45	318,65	318,73	318,74	318,84	319,03	319,58
т, тыс. ч.		0	5	10	15	20	25	30	35

РЭО может снижаться в шестьдесят пять раз и более при окислении металла ППП табл. 3.10.

Анализ зависимостей  $T(t)$ , приведенных в табл. 3.8 – 3.9 показывает, что несмотря на образование пленки окисла алюминия толщиной до 6 мкм температура проводников изменяется на сотые доли градуса за многие месяцы работы при изменяющихся условиях тепловыделения и теплоотвода (влияние пленки) в некотором поперечном сечении проводника. Этот эффект можно объяснить тем, что тепло по металлу передается не только по радиальной, но и по продольной координате. То есть возможный перегрев в одном сечении проводника не отражается на температурном поле материала, т.к. энергия интенсивно передается в другие сечения за счет теплопроводности. В итоге температура проводника определяется условиями теплообмена с внешней средой.

Но следует подчеркнуть, что полученные теоретические оценки значений  $T$ ,  $h$ ,  $\mu$  являются по существу нижними оценками, потому что при их численном определении учитывалось только тепло выделяющееся в металлическом проводнике в результате движения электронов. Но в реальных полупроводниковых приборах и в интегральных микросхемах кроме этой энергии выделяется большое количество теплоты которое в описаниях ППП характеризуется как рассеиваемая мощность. В представленных выше постановках задач это тепловыделение не учитывалось в связи с необходимостью решения пространственных нелинейных задач теплопереноса в многосвязных областях с локальными источниками энергии. Такие задачи представляют самостоятельную проблему и требуются специальные методы их решения. Применительно к рассматриваемым выше постановкам можно сделать вывод о том, что они являются методической базой для нижних оценок работоспособности металлических радиотехнических материалов и надежности элементов радиоэлектронной и электронной техники в условиях воздействия химически активной внешней среды.

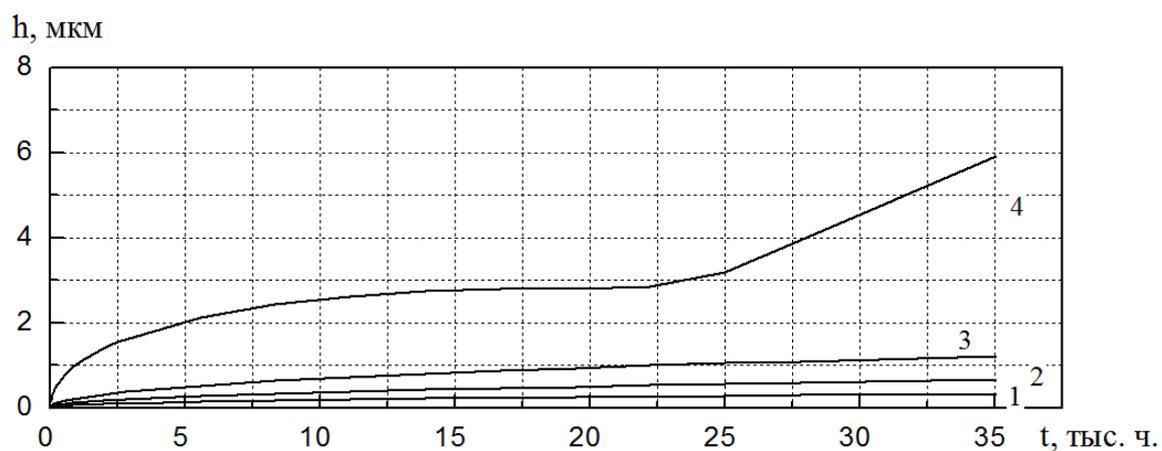


Рисунок 3.27. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени при  $\alpha = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 1 –  $T_{\text{в}}=263 \text{ К}$ ; 2 –  $T_{\text{в}}=273 \text{ К}$ ; 3 –  $T_{\text{в}}=283 \text{ К}$ ; 4 –  $T_{\text{в}}=310 \text{ К}$

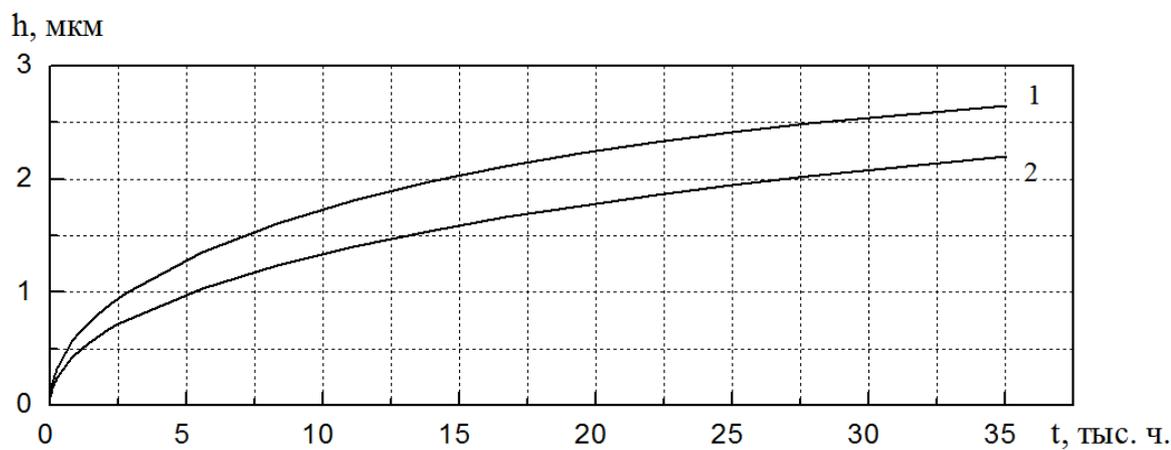


Рисунок 3.28. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени при  $T_{\text{в}}=300 \text{ К}$ ; 1 –  $\alpha=1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; 2 –  $\alpha=3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

Таблица 3.10. Изменение во времени интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике при  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 1 –  $T_B=263$  К; 2 –  $T_B=273$  К; 3 –  $T_B=283$  К; 4 –  $T_B=310$  К

$\mu$ , $10^{-9}$ ч <sup>-1</sup>	1)	0,04417	0,04428	0,04432	0,04435	0,04438	0,04439	0,04442
	2)	0,11887	0,121687	0,1219	0,122072	0,12222	0,122287	0,122447
	3)	0,30845	0,317494	0,3185	0,319301	0,31998	0,320287	0,321014
	4)	2,98	3,16	3,18	3,18	3,2	3,25	3,38
t, тыс. ч.		0	10	15	20	25	30	35

Таблица 3.11. Изменение во времени интенсивности отказов электронного прибора с дефектом защитного покрытия в проводнике при  $T_B=300$  К; 1 –  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); 2 –  $\alpha=3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\mu$ , $10^{-9}$ ч <sup>-1</sup>	1)	1,35	1,41	1,42	1,43	1,43	1,43	1,44
	2)	0,895	0,903	0,9048	0,9061	0,9071	0,9075	0,9085
t, тыс. ч.		0	10	15	20	25	30	35

Из-за отсутствия экспериментальных данных оценка достоверности полученных в ходе вычислений результатов по температурным полям области решения проводилась проверкой консервативности разностной схемы.

Погрешность по балансу энергии определялась с помощью выражений (2.65-2.68).

При численном моделировании исследуемых процессов установлены зависимости точности вычисления баланса энергии от шага по времени  $\tau$  и шага по координатам  $x_m, y_j$  (табл. 3.12, 3.13).

Таблица 3.12. Зависимость погрешности вычисления баланса энергии  $\eta$  от шага по времени при  $h_{\min}=0,1$  нм,  $M=J=200$

$\tau$ , мс	50	20	10	5	2	1	0,5	0,1
$\eta$ , %	5,35	2,87	1,65	0,56	0,42	0,08	0,079	0,078

Табл. 3.12 показывает, что при уменьшении шага по времени значительно уменьшается погрешность по балансу энергии в рассматриваемой системе.

Следует отметить, что при шагах по времени меньше 1 мс наблюдается значительное увеличение вычислительных затрат и незначительное уменьшение  $\eta$ . Поэтому для получения достаточно высокой точности вычисления можно использовать шаги по времени порядка 1 мс.

Таблица 3.13. Зависимость погрешности вычисления баланса энергии от шага по пространственной координате  $x_m, y_j$  при  $\tau=1$  мс,  $x_{\min}=0,1$  нм

$M$	40	50	80	100	120	150	180	200
$J$	40	50	80	100	120	150	180	200
$\eta$ , %	0,7	0,5	0,3	0,23	0,2	0,1	0,09	0,08

Из табл. 3.13 видно, что погрешность вычисления баланса энергии уменьшается с увеличением числа узлов пространственной сетки  $M$  и  $J$ . При  $\tau=1$  мс для области решения задачи размерами  $L_x = 15$  мкм,  $L_y = 15$  мкм,  $M=200$ ,  $J=200$  получается приемлемый результат. Дальнейшее уменьшение шага по координате приводит к незначительному изменению  $\eta$ .

На основании результатов, полученных по итогам выполненного математического моделирования процесса окисления металла в условиях работы реальной интегральной микросхемы можно сделать выводы о высокой вероятности реализации этого процесса и масштабов его влияния на надежность схемы.

При уменьшении площади поперечного сечения проводника и роста температуры, возрастает и скорость окисления металла.

Из табл. 3.10 видно, что процесс окисления значительно влияет на надежность электронного прибора. Продолжительная эксплуатация электронного прибора приводит к интенсификации тепломассопереноса в проводнике. Локальный нагрев с одновременным окислением проводника в течение длительного времени может приводить к существенному снижению надежности электронного прибора.

В результате численных исследований установлено, например, что длительная эксплуатация микросхемы при температуре окружающей среды  $T_b=313$  К,  $\alpha=1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) (при условии локального растрескивания защитной пленки) может привести к отказу прибора за время  $t=35$ ·тыс. часов.

Время работы ИС до отказа определяется температурой металла, скоростью окисления, поперечными размерами проводника.

В микросхеме могут одновременно окисляться и другие соединительные проводники, что повлечет за собой возможно более ранний отказ ИС.

В заключении можно также особо отметить, что результаты выполненных численных исследований показывают перспективность предложенного в диссертации подхода к анализу надежности электронных

схем в условиях интенсивного тепломассопереноса и окисления их элементов. Важнейшим достоинством предложенного подхода является то, что для реализации процесса теоретического анализа показателей надежности РЭО 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 любой из представленных выше математических моделей достаточно информации о теплофизических характеристиках материалов, используемых для изготовления, например, микросхем, и постоянных, характеризующих окисление металлов в воздушной среде или при наличии водяного пара. Разработанная при написании диссертации теория является по существу автономной. Для ее применения достаточно базы данных по теплофизическим характеристикам и кинетическим параметрам процессов окисления. 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 радиотехнических металлических материалов для большого числа приложений в радиоэлектронной и электронной технике.

Для увеличения долговечности, надежности радиотехнических материалов и качества изделий на их основе корпуса электронных приборов следует изготавливать из пластика с определенной степенью эластичности [44], которые не растрескиваются в процессе эксплуатации, а так же покрывать токоведущие элементы электронных схем влагозащитными лаками и красками при техническом обслуживании.

Результаты работы используются на предприятии электротехнической и радиоэлектронной промышленности. Получен акт внедрения диссертационной работы в научной и производственной деятельности компании ООО "НПК ИНТЭК", занимающейся производством навигационной аппаратуры ГНСС: NAVSTAR (GPS), ГЛОНАСС, GALILEO, и других систем и комплексов в области безопасности, навигации и связи, для широкого потребителя, с использованием самых совершенных технологий и новейших разработок в области электроники и технического дизайна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы, полученные при выполнении работы, заключаются в следующем.

1. Предложена новая методика к прогностическому моделированию характеристик параметрической надежности радиотехнических материалов и изделий, в основе которой лежит анализ реальных процессов окисления в условиях интенсивного теплопереноса, протекающих при работе радиоэлектронного оборудования и электронной техники.
2. Новая методика к прогностическому моделированию 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 интенсивность отказов  $\mu$  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.

## Список литературы

- 1 Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Теплофизические аспекты надежности элементов радиоэлектронной аппаратуры // Труды второй Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: Изд-во МЭИ, 1998, Т.1, С. 117-120.
- 2 Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В.. Расчет температурного поля печатной платы с учетом конвективного и радиационного теплообмена на поверхности платы // Инженерно-физический журнал, 2002, том 75, №5, С. 177-179.
- 3 Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В. О влиянии неоднородности температурного поля на надежность электрорадиоизделий // Успехи современной радиоэлектроники, 2003, № 7, С. 48–53.
- 4 Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Численное моделирование температурных полей силовых транзисторов с учетом разрывов коэффициентов переноса. // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд. ТПУ, 2005, Т. 308, № 1, С. 150-155.
- 5 Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Численное моделирование пространственного поля температур в силовом транзисторе // Радиотехника, 2006, №3, С. 62-66.
- 6 Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В. Особенности моделирования показателей надежности типичных печатных узлов РЭА при циклической работе // Электромагнитные волны и электронные системы, 2005, №11-12, С. 19-23.
- 7 Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. -247 с.
- 8 Дульнев Т.Н. и др. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
- 9 Маджарова Т.Б., Гаврилова Г.А. Изменение параметров полупроводниковых линейных интегральных микросхем в зависимости от

- температуры воздуха // Электронная техника, Серия 8, 1975, Вып.1(31), С.21-32.
- 10 Котляр Я.М., Совершенный В.Д., Стриженов Д.С. Методы и задачи тепломассообмена. – М.: Машиностроение, 1987. -345 с.
  - 11 Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. -305 с.
  - 12 Сокол В.А., Широков Ю.Ф. Анализ процесса нагрева тонкопленочных резисторов в полупроводниковых устройствах // Электронная техника, Серия 2, Полупроводниковые приборы, 1982, вып. 5(156), С. 3-8.
  - 13 Шукейло Ю.А., Акбулатов Р.Н., Вахмистров А.П. Расчет температурного поля микросхемы с ЦМД // Инженерно-физический журнал, 1983, том XLIV, №3, С. 487-489.
  - 14 Бабаян Р.Р., Ретинский П.И., Глущенко В.И., Бикулов А.Ф., Жуков А.П., Морозова Н.В. Расчет температурных полей в гибридных интегральных микросхемах // Микроэлектроника, 1986, том 15, вып. 2, С. 173-179.
  - 15 Закс Д.И., Мадера А.Г., Наговицина Л.Ф. Метод машинного расчета теплового режима ИС, учитывающий отвод тепла через выводы и крышку корпуса // Электронная техника, Серия 3, Микроэлектроника, 1980, вып. 5(89), С. 55-60.
  - 16 Мельник В.Н. Моделирование нестационарных тепловых режимов интегральных схем с учетом внутренней нелинейности // Электронное моделирование, 1992, Том 14, №3, С. 91-100.
  - 17 Абрамов И.И., Харитонов В.В. Численный анализ функционально-интегрированных элементов СБИС с учетом тепловых эффектов. 1. Модель // Инженерно-физический журнал, 1988, том 54, №2, С. 309-315.
  - 18 Абрамов И.И., Харитонов В.В. Численный анализ функционально-интегрированных элементов СБИС с учетом тепловых эффектов. 2. Метод и программа // Инженерно-физический журнал, 1988, том 54, №3, С. 493-499.
  - 19 Абрамов И.И., Харитонов В.В. Численный анализ функционально-интегрированных элементов СБИС с учетом тепловых эффектов. 3.

- Результаты моделирования // Инженерно-физический журнал, 1988, том 54, №5, С. 823-828.
- 20 Абрамов И.И., Харитонов В.В. Многомерное численное моделирование элементов ИС с совместным учетом эффектов сильного легирования, саморазогрева и температуры окружающей среды // Электронное моделирование, 1991, Том 13, №4, С. 60-64.
- 21 Лейбович М.Г., Шилов А.М. Построение корректной разностной схемы для численного моделирования электротепловых процессов в полупроводниках // Электронное моделирование, 1990, Том 12, №6, С. 82-85.
- 22 Нечаев А.М., Синкевич В.Ф., Козлов Н.А. Расчет стационарных тепловых полей в структурах мощных транзисторов // Электронная техника, Серия 2, Полупроводниковые приборы, 1989, вып. 1(198), С. 19-24.
- 23 Рубаха Е.А., Минин В.Ф. Тепловые состояния транзисторной структуры в импульсных режимах // Электронная техника, Серия 2, Полупроводниковые приборы, 1983, вып. 7(166), С. 52-60.
- 24 Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М: Радио и связь, 1988. -256 с.
- 25 Борисов А.А., Горбачева В.М., Карташов Г.Д., Мартынова М.Н., Прытков С.Ф. Надежность зарубежной элементной базы // Зарубежная радиоэлектроника, 2000, № 5, С. 34-53.
- 26 Строгонов А.В. Долговечность субмикронных БИС и ПЛИС // Микроэлектроника, 2005, том 34, № 2, С. 138-158.
- 27 Борисов А.А., Карташов Г.Д. Экспресс-метод оценивания остаточной надежности // Электромагнитные волны и электронные системы, 2007, том 12, № 6, С. 4-11.
- 28 Борисов А.А., Карташов Г.Д. Оценивание остаточной надежности на основе модели утраты работоспособности // Электромагнитные волны и электронные системы, 2006, том 11, № 10, С. 4-10.
- 29 Садыхов Г.С., Савченко В.П. Зависимость показателей ресурса от характеристик его расходования // ДАН, 1998, Т. 361, № 2, С. 189-191.

- 30 Садыхов Г.С., Савченко В.П. Оценка остаточного ресурса изделий с использованием физической модели аддитивного накопления повреждений // ДАН, 1995, Т. 343, № 4, С. 469-472.
- 31 Карташов Г.Д., Садыхов Г.С. Основные методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники // Успехи современной радиоэлектроники, 2000, №9, С. 3-20.
- 32 Садыхов Г.С., Савченко В.П., Федорчук Х.Р. Непараметрический метод оценки нижней доверительной границы среднего остаточного ресурса технических изделий // ДАН, 1995, Т. 343, № 3, С. 326-328.
- 33 Теверовский А.А., Епифанов Г.И., Константинов А.А. Надежность полупроводниковых приборов, герметизированных в пластмассу // Обзоры по электронной технике, Сер. 2, Полупроводниковые приборы, 1979, Вып. 10, С. 47-51.
- 34 Теверовский А.А., Омаров Б.Ш., Гутник Д.И. Исследование влагостойкости микросхем в пластмассовых корпусах с помощью тестовых структур // Электронная техника, Сер. 8, 1986, Вып. 1, С. 46-54.
- 35 Теверовский А.А., Коваленко А.А. Методы контроля содержания влаги в корпусах микросхем // Электронная техника, Сер. Упр. кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1983, Вып. 4, С. 17-20.
- 36 Волков С.И., Григорашвили Ю.Е., Полякова Е.В. Моделирование коррозионных отказов интегральных схем // Электронная техника, Сер. Упр. кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1981, Вып. 4, С. 24-27.
- 37 Русанова А.Л. Исследование кинетики коррозии металлизации и разработка модели времени до отказа ИС // Электронная техника, Сер. Упр. кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1983, Вып. 2, С. 65-70.
- 38 Горнев Е.С., Денисова Л.А., Мартынов В.И., Миллер Ю.Г. Исследование коррозионной стойкости внутрисхемной разводки интегральных схем // Электронная техника, Сер. Упр. кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1981, Вып. 4, С. 28-30.

- 39 Bernard M.C., Gabrielli C., Joiret S., Mace C., Ostermann E., Pailleret A. Investigations on the corrosion of copper patterns in the course of the “post-CMP cleaning” of integrated electronic microcircuits in oxalic acid aqueous solutions // *Electrochimica Acta* 45(2007), P. 723-736.
- 40 Ping Zhao, Michael Pecht. Field failure due to creep corrosion on components with palladium pre-plated leadframes // *Microelectronics Reliability* 43 (2003), P. 775-783.
- 41 Caroline M. Whelan, Michael Kinsella, Laureen Carbonell, Hong Meng Ho, Karen Maex. Corrosion inhibition by self-assembled monolayers for enhanced wire bonding on Cu surfaces // *Microelectronic Engineering* 70 (2003), P. 551-557.
- 42 R.S. Lillard, M.A. Paciotti A model for analyzing corrosion data from pulsed proton beam irradiation experiments // *Journal of Nuclear Materials*, 2002, № 303, P. 105-114.
- 43 Бартнев Г.М., Зеленеv Ю.М. Физика и механика полимеров. – М.: Высшая школа, 1983. -391 с.
- 44 Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: – Химия, 1968. -536 с.
- 45 Карташов Э.М., Цой Б., Шевелев В.В. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров. – М.: Химия, 2002. -736 с.
- 46 Новаченко И.В., Юровский А.В. Микросхемы для бытовой радиоаппаратуры. Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. -176 с.
- 47 Семенов А.Н., Левченко Т.П. Надежность бортового радиоэлектронного авиационного оборудования и методы ее оценки // *Зарубежная радиоэлектроника*, 1989, № 1, С. 3-23.
- 48 Ткачев В.И. Модель динамики отказов радиоэлектронной техники с учетом особенностей эксплуатации, конструкторского и схемотехнического построения // *Радиотехника*, 2002, № 10, С. 86-89.
- 49 Федюнин Б.Н. Некоторые новые пути исследования задачи ускоренных испытаний радиоэлектронных изделий // *Стандарты и качество*, 1968, № 5, С. 32-35.

- 50 Веников В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. М.: Высш. шк, 1966. -425 с.
- 51 Жаднов В., Полесский С., Якубов С. Прогнозирование безотказности микросхем для военной и аэрокосмической электроники // Электронные компоненты, 2007, №3, С. 39-48.
- 52 Намичейшвили О.М., Табатадзе Т.Н. Нестандартные модели для предсказания надежности электронных изделий, Радиотехника, 1999, № 9, С. 32-38.
- 53 Малков Я.В. Диагностика деградационных процессов в полупроводниковых структурах с позиций междисциплинарных теорий // Зарубежная радиоэлектроника, 1996, № 5, С. 77-82.
- 54 Нечаев А.М., Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф. Причинно-следственные методы при исследовании надежности мощных транзисторов // Электронная техника, Сер. Упр. Кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1981, вып. 4 (90), С. 16-20.
- 55 Григорашвили Ю.В. Модель отказа и исследование надежности жестких выводов интегральных схем // Электронная техника, Сер. Упр. Кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1981, вып. 4 (90), С. 20-24.
- 56 Добыкин В.Д. Оценка статистических характеристик теплового поражения полупроводниковых приборов // Радиотехника, 2004, № 10, С. 38-43.
- 57 Астраханский Ю.Л. Аналитическая модель миграционной поляризации МОП структур // Электронная техника, Сер. Упр. Кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1981, вып. 4 (90), С. 12-15.
- 58 Достанко А.П., Ивкин В.М., Баранов В.В., Портнов Л.Я. Механизмы отказов контактов и тонкопленочных межсоединений полупроводниковых приборов и интегральных схем // Электронная техника, Сер. Упр. Кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1982, вып. 4 (82), С. 51-61.
- 59 Горюнов Н.Н., Ладыгин Е.А., Назарова Г.С. Физическая природа ЭДС между элементами полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

- // Электронная техника, Сер. Упр. Кач-вом, Стандартизация, Метрология, Испытания, 1983, вып. 4 (103), С. 3-4.
- 60 Чумаков А.И., Гонтарь В.В. Оценка уровней сбоев интегральных схем при воздействии последовательности импульсов ионизирующего излучения // Микроэлектроника, 2006, том 35, № 3, С. 178-183.
- 61 Горлов М.И., Плебанович В.И., Строгонов А.В. Контроль стабильности алюминиевой металлизации к явлению электромиграции по резистометрическим измерениям // Микроэлектроника, 2006, том 35, № 4, С. 277-284.
- 62 ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике.
- 63 Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергоиздат, 1981. -533 с.
- 64 Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. -616 с.
- 65 Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. -288 с.
- 66 Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1977. -656 с.
- 67 Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. -583 с.
- 68 Коррозия. Справ. изд. Под. ред. Л.Л. Шрайера. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1981. -632 с.
- 69 Войшвилло Г.В. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1983. -264 с.
- 70 URL: [http://www.coppergas.ru/?page\\_id=232](http://www.coppergas.ru/?page_id=232)
- 71 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.
- 72 Жук, Н.П. Коррозия и защита металлов; Расчеты / Н. П. Жук. — М. : Машгиз, 1957. – 331 с.

- 73 Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. -368 с.
- 74 Атаев Д.И., Болотников В.А. Аналоговые интегральные микросхемы для бытовой радиоаппаратуры: Справочник. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. -240 с.
- 75 Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. -464 с. ил. ISBN 978-5-93517-339-5.
- 76 Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. -1006 с.
- 77 Теплофизические основы математического моделирования показателей надежности печатных узлов радиоэлектронной аппаратуры диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук: спец. 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника С.В. Шлома; науч. рук. Г.В. Кузнецов Томск 2003.
- 78 Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. -512 с.
- 79 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.
- 80 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.
- 81 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.

- 82 Титов А.В. Численное моделирование характеристик надежности радиоаппаратуры // Научная сессия ТУСУР 2007: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Тематический выпуск «Системная интеграция и безопасность»: – Томск: Изд-во «В-Спектр», 2007. Ч. 1. -364 с.
- 83 Мамонтов Г.Я., Титов А.В. Численное моделирование характеристик надежности радиоаппаратуры // Материалы докладов международной конференции «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» -Томск: Изд-во ТГУ, 2007, С. 45-48.
- 84 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. С. 84-86.
- 85 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.
- 86 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.
- 87 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.
- 88 Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Титов А.В. Численный анализ влияния окисления алюминиевой металлизации на характеристики интегральной схемы // Инженерная физика, Издательство Научтехлитиздат. 2009, №8, С. 21-26.

- 89 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).
- 90 Информационный образовательный ресурс локального доступа <Программа расчета температурных полей и окисления металла в радиоэлектронных приборах TFTA v.1.0>: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 16903 / А.В. Титов, Г.В. Кузнецов, Г.Я. Мамонтов. № 50201150464; заявл. 04.04.2011; опублик. 04.04.2011. Алгоритмы и программы № 6, 1 с.
- 91 Титов А.В., Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я. Информационный ресурс "Программа расчета температурных полей и окисления металла в радиоэлектронных приборах TFTA v.1.0" // Библиотека РТО на портале ОФЭРНиО. 04.04.2011. – URL: [http://ofernio.ru/rto\\_files\\_ofernio/16903.doc](http://ofernio.ru/rto_files_ofernio/16903.doc) (дата обращения: 04.04.2011)
- 92 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).
- 93 Информационный образовательный ресурс локального доступа <Динамика окисления проводника в тепловом поле TDTF v.1.0>: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 16971 / А.В. Титов. № 50201150488; заявл. 07.04.2011; опублик. 18.04.2011. Алгоритмы и программы № 6, 1 с.

94 Титов А.В. Информационный ресурс "Динамика окисления проводника в тепловом поле TDTF v.1.0" // Библиотека РТО на портале ОФЭРНиО. 18.04.2011. – URL: [http://ofernio.ru/rto\\_files\\_ofernio/16903.doc](http://ofernio.ru/rto_files_ofernio/16903.doc) (дата обращения: 07.04.2011)