

Исследования, проведенные НПО ПМ (г. Железногорск) совместно с НИИ АЭМ (г. Томск), показали, что для обеспечения наземных электрических испытаний необходим широкополосный ИБС нового поколения – на параметрическом принципе, что позволяет обеспечить формирование статических и динамических характеристик ИБС, близких к реальным характеристикам СБ.

Структурная схема силовой части ИБС практически полностью совпадает с эквивалентной схемой реальной СБ, чем обеспечивается тождественность испытаний с помощью ИБС СЭП КА реальным условиям работы СЭП от СБ в составе КА.

ИБС-300/25 позволяет с помощью ПЭВМ, используя специализированное программное обеспе-

чение, задавать программу испытаний с непрерывным ведением протокола результатов испытания.

ИБС, реализованный с использованием источников напряжения с безынерционным ограничением тока, имеет следующие преимущества:

- идеальная частотная характеристика, т. е. совпадение статической и динамической ВАХ ИБС и СБ;
- простота регулирования характеристик ВАХ ИБС с запасом, перекрывающим область реального изменения ВАХ СБ вследствие технологического разброса, деградации батарей на орбите, выхода из строя их отдельных модулей;
- возможность проведения полных наземных испытаний СЭП КА как в штатных, так и в аварийных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соустин Б.П., Иванчура В.И., Чернышев А.И., Исляев Ш.Н. Системы электропитания космических аппаратов. – Новосибирск: Наука, 1994. – 318 с.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 327 с.
3. Гордеев К.Г., Шиняков Ю.А., Чернышев А.И., Эльман В.О. Критерии выбора схемы стабилизации напряжения солнечных батарей для системы электроснабжения космического аппарата // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. под ред. В.Н. Гладушенко. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 43–48.
4. Поляков С.А. Выбор режима работы солнечных батарей // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. под ред. В.Н. Гладушенко. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 49–58.
5. Амелеченко А.Н. Устройство для исследования статических и динамических характеристик солнечных батарей // Сб. тез. докл. Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов СибГАУ. – Красноярск, 2006. – С. 122–123.

Поступила 25.03.2008 г.

УДК 621.396.6+621.792

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г.В. Кузнецов*, Г.Я. Мамонтов, А.В. Титов

*Томский политехнический университет
Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: avtitov@sibmail.com

Проведено численное моделирование нестационарного двумерного температурного поля токоведущей дорожки полупроводникового прибора для двух случаев работы типичного силового транзистора: в условиях окисления проводника кислородом воздуха, и без протекания процесса окисления металла. Сопоставлены интенсивности отказов транзистора для этих двух случаев. Показано, что изменение интенсивности отказов в условиях окисления составляет не менее 50 %. Установлено, что при оценке показателей надежности приборов необходимо проводить анализ с учетом процесса окисления металла.

Введение

Обрыв металлизации является одним из основных источников сбоев в работе интегральных схем и транзисторов и составляет более 50 % всех отказов [1]. Причиной обрыва является электрохимическая коррозия проводника. Наиболее часто выходят из строя полупроводниковые приборы (ППП) изготовленные в металлопластиковом корпусе, т. к. фактически пластмассовые корпуса не защищают приборы от проникновения влаги и воздуха при длительной эксплуатации [1].

Типичные полимерные материалы типа полиэтилена, используемые для изоляции ППП, при длительной эксплуатации в условиях циклических и механических нагрузок растрескиваются [2].

В результате длительного воздействия температурных и электрических нагрузок процессы коррозии металлизации в ППП, как и любые деградационные процессы ускоряются.

Силовые элементы являются самыми уязвимыми по показателям долговечности любого устрой-

ства. Типичным для силовых транзисторов является размещение на одном кристалле нескольких транзисторных структур, соединенных параллельно [3]. Это позволяет увеличить максимальный ток коллектора прибора и повысить мощность, отдаваемую в нагрузку.

Обычно соединения контактных площадок металлизации базы и эмиттера в транзисторе с внешними выводами делают с помощью тонкой алюминиевой, медной или золотой проволоки, диаметр которой варьируется от 25 до 250 мкм [1, 3]. В случае если максимальный ток коллектора транзистора достигает 10 А, плотность тока на гибком проводнике может достигать $(0,3..3) \cdot 10^9$ А/м². Если по какой-либо причине во время длительной эксплуатации происходит повреждение защитного корпуса прибора (образование трещины) в зоне, где находится соединительный проводник, то коррозия проводника ускоряется благодаря подводу окислителя к поверхности металла. Трещины такого рода не всегда можно обнаружить даже при осмотре ППП. В области дефекта корпуса прибора вследствие окисления проводника омическое сопротивление последнего при длительной эксплуатации увеличивается. Происходит возрастание плотности тока в проводнике, а это приводит к интенсификации разогрева данной области. Соответственно растет скорость окисления проводника, т. е. рассматриваемый процесс является самоускоряющимся. С другой стороны скорость окисления обратно пропорциональна толщине оксидной пленки, поэтому процесс не является легко прогнозируемым.

До настоящего времени не опубликовано сведений о реализации методик прогнозирования изменения характеристик надежности силовых транзисторов с учетом процессов окисления металлических элементов.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса изменения характеристик надежности биполярного транзистора большой мощности в результате интенсивного теплообмена с окружающей средой и окисления в условиях локального растрескивания защитного пластика металлического проводника.

Постановка задачи

В качестве объекта исследования выбран транзистор КТ819Г, выполненный в корпусе ТО-220, рис. 1.

Рассматривается задача о температурном поле двухслойной («металл-полимер») пластины с локальным дефектом (трещиной), рис. 2. Нагрев металлического проводника происходит за счет протекания тока. Возрастание температуры способствует увеличению скорости окисления металла воздухом в трещине. В результате образуется окисная пленка, которая в некоторой степени тормозит процесс подвода кислорода к поверхности чистого металла. Но при этом уменьшается площадь поперечного сечения проводника. Соответственно из-

меняются условия для движения электрических зарядов в зоне окисления, т. к. окислы металлов, как правило, являются диэлектриками. Учитываются зависимости скорости окисления и коэффициентов диффузии от температуры.

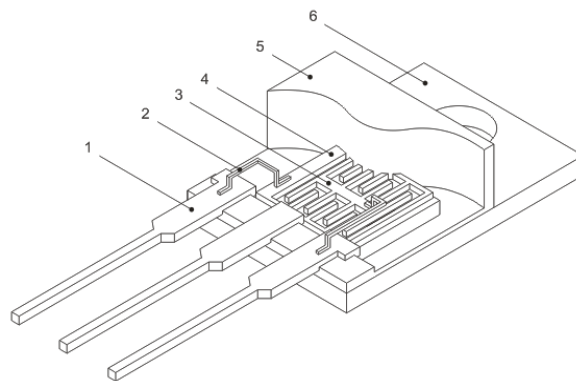


Рис. 1. Общий вид транзистора КТ819Г: 1) внешние выводы; 2) медный проводник; 3) эмиттерное медное напыление на кристалле; 4) базовое медное напыление на кристалле; 5) корпус прибора; 6) медное основание

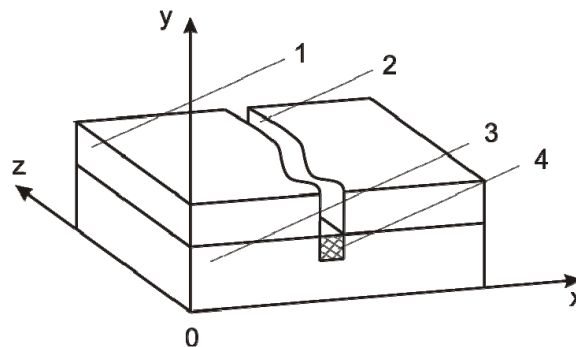


Рис. 2. Медный проводник транзистора, покрытый изоляцией: 1) пластик; 2) локальный дефект (трещина); 3) металлический проводник; 4) слой окисла

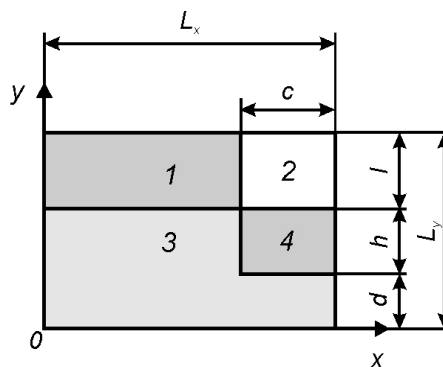


Рис. 3. Область решения задачи: 1) защитный слой; 2) воздух; 3) металлический проводник; 4) пленка окисла

Задача решена в двумерной постановке в декартовой системе координат.

Область решения включает в себя несколько элементов (зон) с отличающимися теплофизическими характеристиками и размерами – медная пластина, защитная пленка (полимер), воздушная область, пленка окисла, рис. 3. На границах: между элементами реализуется идеальный тепловой кон-

такт и заданы граничные условия четвертого рода; на внешней верхней — условие третьего рода; на боковых и нижней — условия теплоизоляции.

Математическая модель

Задача сводится к решению нестационарных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} C_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), \\ C_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right), \\ C_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} &= \lambda_3 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) + Q, \\ C_4 \cdot \rho_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial t} &= \lambda_4 \cdot \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right), \end{aligned}$$

где C_i — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); i — номер области решения; ρ_i — плотность, кг/м³; T_i — температура, К; λ_i — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q — интенсивность тепловыделения, Дж; x, y — пространственные координаты, м; t — время, с.

Интенсивность тепловыделения в проводнике рассчитывалась следующим образом:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau,$$

где I — ток коллектора, А; R — сопротивление проводника, Ом; τ — шаг расчета по времени, с.

Сопротивление проводника с учетом температуры, и площади поперечного сечения определялось по формулам:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad R_0 = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где R_0 — сопротивление проводника при температуре $T_0 = 273,15$ К, Ом; ρ — удельное сопротивление проводника, Ом·мм²/м; l — длина проводника, м; S — площадь поперечного сечения проводника, мм²; α — температурный коэффициент сопротивления, 1/град С.

В начальный момент времени температура в каждой зоне принималась равной $T_{\text{нач}}$

$$\begin{aligned} T|_{t=0} &= T_{\text{нач}}, \\ t \in [0; t_{\text{max}}], \quad x \in [0; L_x], \quad y \in [0; L_y], \end{aligned}$$

где t_{max} — заданное время работы прибора, с; L_x, L_y — линейные размеры пластины, м.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} x = 0; \quad y \in [0; d + h]; \quad \frac{\partial T_3}{\partial x} &= 0; \\ x = 0; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \frac{\partial T_1}{\partial x} &= 0; \\ x = L_x - c; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad T_1 &= T_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x = L_x; \quad y \in [d; d + h]; \quad \frac{\partial T_4}{\partial x} &= 0; \\ x = L_x; \quad y \in [d + h; L_y]; \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} &= 0; \\ y = 0; \quad x \in [0; L_x]; \quad \frac{\partial T_3}{\partial y} &= 0; \\ y = d + h; \quad x \in [0; L_x - c]; \quad T_1 &= T_3; \\ y = d + h; \quad x \in [L_x - c; L_x]; \\ \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} + Q_{\text{окисл}} \cdot W_{\text{O}_2} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}; \\ y = L_y; \quad x \in [0; L_x - c]; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \alpha(T_B - T_1) + \varepsilon_{\text{np}} \sigma (T_B^4 - T_1^4); \\ y = L_y; \quad x \in [L_x - c; L_x]; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \alpha(T_B - T_2) + \varepsilon_{\text{np}} \sigma (T_B^4 - T_2^4), \end{aligned}$$

где $Q_{\text{окисл}}$ — тепловой эффект реакции, рассчитанный на единицу массы кислорода, Дж/кг. Величина принималась равной $Q_{\text{окисл}} = 16,5 \cdot 10^6$ Дж/кг [4].

Уравнение диффузии кислорода в пленке окисла имеет следующий вид:

$$\frac{\partial C_{\text{O}_2}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_{\text{O}_2}}{\partial y^2},$$

где C_{O_2} и D — концентрация кислорода и коэффициент диффузии кислорода в оксидной пленке по координате y области решения соответственно.

Скорость химической реакции по окислителю (кислороду) прямо пропорциональна концентрации окислителя и обратно пропорциональна толщине окисной пленки [4]:

$$W_{\text{O}_2} = \frac{k}{h} \rho_g n_{\text{O}_{2s}}, \quad k = k_0 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right),$$

где k — константа скорости химической реакции, м²/с; k_0 — предэкспоненциальный множитель, м²/с; ρ_g — плотность газа (воздуха), кг/м³; h — толщина оксидной пленки, м; $n_{\text{O}_{2s}}$ — относительная массовая концентрация кислорода на поверхности металла; E_1 — энергия активации, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Относительная массовая концентрация окислителя на поверхности металла находится из условия равенства массового потока окислителя к поверхности и скорости его потребления в химических превращениях:

$$n_{\text{O}_{2s}} = n_{\text{O}_{2\infty}} \left(\frac{kd^2}{h\beta d_h^2} + 1 \right)^{-1}, \quad \beta = \frac{\text{Nu}_D D}{d_h}, \quad D = \frac{\lambda_g}{c_g \rho_g},$$

где $n_{\text{O}_{2\infty}}$ — относительная массовая концентрация кислорода в воздухе; β — коэффициент массообмена, м/с; λ_g — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); c_g — удельная теплоемкость воздуха,

Дж/(кг·К); d_h – толщина металла покрытого окислом, $d_h = d + h$, м; d – толщина металла без учета окисной пленки, м; Nu_d – диффузионный критерий Нуссельта.

Зависимость плотности и коэффициента теплопроводности газа от температуры учитывалось следующим образом:

$$\rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left(\frac{T_*}{T_0} \right)^n, \quad T_* = \frac{T + T_a}{2},$$

где ρ_{g0} , λ_{g0} – плотность и коэффициент теплопроводности газа при температуре $T_0 = 273,15$ К; T_a – температура воздуха; T_* – характерная температура, при которой определяются свойства газа; $n = 0,75$ (для воздуха).

Для расчета интенсивности отказа транзистора от температуры использовалась хорошо известное уравнение Аррениуса [5, 6]:

$$\lambda(T) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{k_1 T}\right), \quad (*)$$

где A – константа; k_1 – постоянная Больцмана. Энергия активации принималась равной $E_2 = 0,7$ эВ [8].

Метод решения

Уравнение теплопроводности для системы «металл – пластик – воздух – окисел металла» и уравнение диффузии для системы «трещина – пленка окисла» с соответствующими краевыми условиями решены методом конечных разностей [7]. Разностные аналоги исходных нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных решены с использованием локально-одномерной схемы. Одномерные разностные уравнения решены методом итераций с применением метода прогонки на каждой итерации. Использовалась неравномерная и нерегулярная разностная сетка со сгущением на границах между областями рис. 3.

Процесс формирования пленки окисла учитывался в алгоритме решения трансформацией разностной сетки.

Результаты численного исследования

Численный анализ выполнен при следующих исходных данных.

Принималось, что транзистор работает в активном режиме непрерывно в течение четырех лет. Сечение проводника в рассматриваемом транзисторе составляло 80×80 мкм, $L_x = 2,1$ мм, $L_y = 2,1$ мм, толщина защитного слоя составляла $i = 2,02$ мм, ширина зоны дефекта $c = 10$ мкм. Проводник нагревался под действием тока $I = 5$ А. Численное моделирование велось на неравномерной сетке. Шаг сетки по координатам x и y 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

300 К. Шаг по времени составлял 36 с. Коэффициент конвективной теплоотдачи на внешней верхней границе принят равным $\alpha = 10$ Вт/(м²·К). Теплофизические характеристики зон области решения приведены в таблице.

Таблица. Теплофизические характеристики материалов [8]

№ области	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1	2000	1500	0,8
2	1006	1,293	0,0257
3	380	8930	385
4	420	4700	150

На рис. 3 представлены типичные распределения температурного поля проводника транзистора без дефекта и с дефектом корпуса прибора.

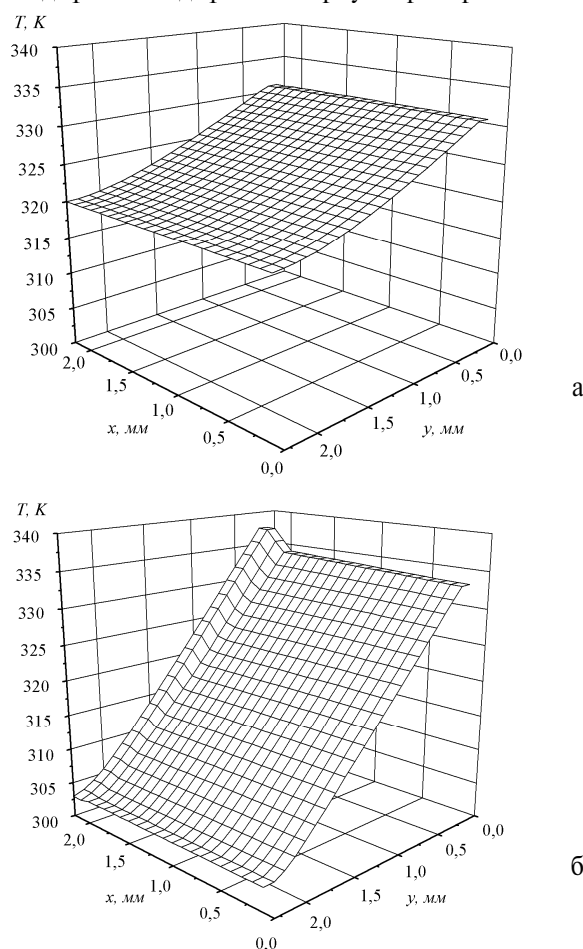


Рис. 3. Распределение температурного поля в проводнике транзистора в момент времени $t = 4$ года: а) без дефекта; б) с дефектом защитного покрытия

Из рис. 3 хорошо видно, что процесс окисления металла приводит к увеличению температуры на границе металл окисел. Это объясняется тем, что при окислении металла кислородом воздуха реакция окисления протекает с выделением тепла.

Рост температуры также обусловлен изменением площади поперечного сечения проводника. Это связано с возрастанием сопротивления проводни-

ка по мере уменьшения площади и как следствие увеличения мощности тепловыделения. Сопротивление проводника возрастает еще и за счет увеличения температуры.

Изменение площади поперечного сечения проводника учитывалось при расчете тепловыделения, обусловленного движением электрических зарядов. Установлено, что по мере роста толщины окисла металла, рис. 4, растет интенсивность разогрева проводника, температура, рис. 5, и скорость окисления, т. е. процесс, является самоускоряющимся. При этом пленка окисла тормозит процесс подвода окислителя к поверхности чистого металла. В итоге саморазогрев проводника не является слишком интенсивным.

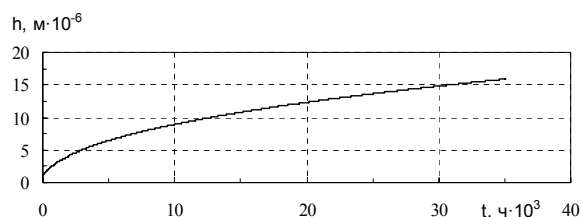


Рис. 4. Зависимость толщины окисной пленки металла от времени

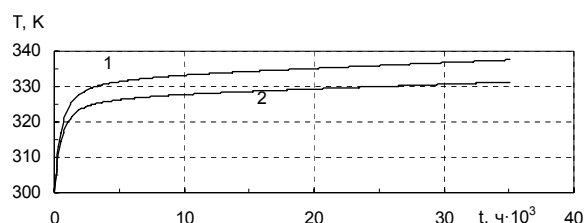


Рис. 5. Зависимость температуры токоведущей дорожки транзистора от времени: 1) с дефектом; 2) без дефекта защитного покрытия

В результате численных исследований установлено, например, что при длительной эксплуатации транзистора в течение 4-х лет (при условии локального растрескивания защитной пленки) образуется оксидная пленка толщиной 16 мкм при характерном поперечном размере металлического проводника 80 мкм.

Изменение показателя интенсивности отказов λ с ростом времени эксплуатации ППП рассчитывалось по известной зависимости Аррениуса, ур. (*). На рис. 6 представлены результаты расчетов $\lambda(T)$.

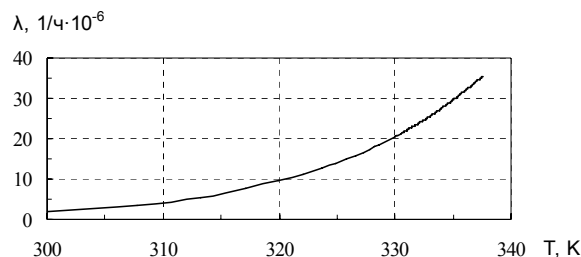


Рис. 6. Зависимость $\lambda(T)$ транзистора в течение продолжительной эксплуатации

Установлено, как и следовало ожидать, существенное увеличение значений λ по мере развития

процесса окисления металла. Продолжительная эксплуатация транзистора (более 4-х лет) приводит к увеличению показателя интенсивности отказов в результате окисления металла в 1,5 раза.

На рис. 7 показано как изменяется сопротивление проводника от времени в результате окисления.

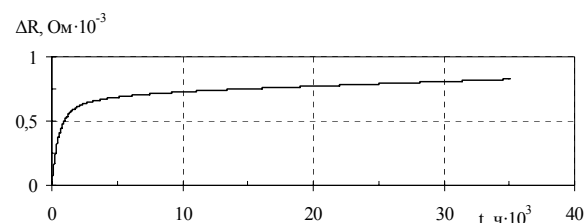


Рис. 7. Изменение сопротивления проводника во времени

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 масштабным последствиям. Поэтому полученные результаты по изменению интенсивности отказов λ можно считать нижними оценками изменений этой характеристики.

В результате численных исследований установлено, например, что при заданных размерах области решения изменение сопротивления проводника ведет к смещению рабочей точки транзистора на величину напряжения смещения на проводнике $\Delta U = 4,1$ мВ. Изменение напряжения смещения на 15 % по сравнению со штатным режимом работы транзистора в большинстве практически значимых реализаций приводит к значимым негативным следствиям. Поэтому полученный результат позволяет по иному рассмотреть причины отклонения характеристик транзисторов от нормативных.

Выводы

На основании результатов математического моделирования процессов тепломассопереноса в системе «проводник — слой окисла — изолятор — окружающая среда» установлено, что окисление токопроводящих элементов приводит к значительному ухудшению показателей надежности типовых силовых полупроводниковых приборов. Масштабы выделенного эффекта при эксплуатации полупроводниковых приборов определяются временем их работы в неблагоприятных условиях (климатические факторы, повышенные температуры). Созданы предпосылки 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 в других окислительных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1988. — 256 с.
2. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.М. Физика и механика полимеров. — М.: Высшая школа, 1983. — 391 с.
3. Блихер А. Физика силовых биполярных транзисторов: Пер. с англ. — Л: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.
4. Орловская С.Г., Калинин В.В., Грызунова Т.В., Копыт Н.Н. Высокотемпературный тепломассообмен и кинетика окисления металлической частицы в воздухе // Химическая физика. — 2004. — Т. 23. — № 3. — С. 49–55.
5. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Высшая школа, 1984. — 247 с.
6. 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.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
8. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К. Кирилина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1006 с.

Поступила 15.04.2008 г.

УДК 338.45:621.31

СОСТОЯНИЕ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

О.А. Суржикова

Чешский технический университет
Томский политехнический университет
E-mail: Olga_surzhikova@mail.ru

Приводится статистический материал и анализ по одному из главных вторичных энергетических ресурсов – электроэнергии. Проанализировано состояние по генерирующим мощностям, спросу, производству, предложению и поставкам электрической энергии по стране, а так же рассмотрены перспективы российского электроэнергетического сектора на ближайшие годы и его взаимосвязь с первичными топливными энергетическими ресурсами.

Электроэнергетика, являясь базовой отраслью российской экономики, обеспечивает как внутренние потребности народного хозяйства и населения в электроэнергии, так и ее экспорт в страны СНГ и дальнего зарубежья.

Производственный потенциал электроэнергетической отрасли России в настоящий момент составляет более 700 электростанций с общей установленной мощностью свыше 215 млн кВт, из которых около 70 % — тепловые электростанции, 20 % — гидравлические и 10 % — атомные. Использование производственных мощностей в электроэнергетике (за исключением ТЭС) в конце прошлого века годах было достаточно стабильным, а на тепловых электростанциях загрузка крупных высокоэффективных блоков снизилась до 2000...4000 ч использования в год, что привело к росту удельного расхода топлива [1, 2].

Россия обеспечивает 5,8 % мировой суммарной установленной электрической мощности, занимая по этому показателю 4 место в мире после США, Китая, Японии,

РАО «ЕЭС России» регулярно разрабатывает балансы электрической мощности по укрупненным регионам России. Эти балансы показывают, что Дальний Восток является пока единственным регионом России с избытком энергетической мощности. Объединенная энергосистема Сибири, традиционно считающаяся избыточной, с колоссаль-

но развитой гидроэнергетикой Ангара-Енисейского каскада, с угольными мощностями Канско-Ачинского и Кузбасского бассейнов, тем не менее, с 2008 г. окажется с нулевым балансом, а с 2009 г. — дефицитной. Пояс средней Волги — второй избыточный регион, который является ключевым для обеспечения сальдо перетоков на Урал и в европейскую часть страны. Но Урал уже в 2006 г. оказался с нулевым балансом, а с 2007 г. стал энергодефицитным регионом. Пояс Центра достигнет нулевого баланса к 2008 г., Северо-Запада — к 2009 году. Кавказ фактически уже испытывает дефицит и держится за счет сальдо перетока из Центрального региона.

После некоторого спада в 1990-е гг. с 2001 г. наметился определенный подъем в создании генерирующих мощностей, так же как и производстве электрической энергии, хотя из необходимых 5...6 млн кВт новых генерирующих мощностей в России ежегодно вводится лишь 1...2 млн кВт.

По производству электричества Россия прочно занимает 4 место в мире после США, Китая, Японии, обеспечивая 5,3 % мирового производства электроэнергии.

Однако в энергетике России существует ряд крупных проблем, требующих принятия кардинальных мер для их скорейшего развития. В отрасли увеличивается количество оборудования, сроки эксплуатации которого превышают проектные.