

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В РАДИОЭЛЕКТРОННОМ КОМПОНЕНТЕ

Введение. Особенностью метода собственного излучения для изделий радиоэлектроники есть наличие прямой связи ресурса радиоэлектронных компонентов (РЕК) с их температурой. Для ряда компонентов (транзисторов, диодов, оксидных катодов, резисторов) рассчитаны статистические зависимости [1]. Оперативность метода собственного излучения наглядно проявляется при исследовании большого количества однотипных цифровых элементов.

Анализ источников [1-3] показал, тепловые поля однотипных изделий хорошо коррелированы. Диагностический параметр (ДП) при проверке технического состояния, формируется в соответствии со способом переноса тепловой энергии (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение) и может быть представлен не только набором числовых значений, но и в виде двумерных (трехмерных) термограмм. После формирования набора информативных признаков могут быть применены алгоритмы распознавания образов.

Анализ возможностей метода собственного излучения показал возможность высокопроизводительной бесконтактной диагностики с применением компьютерной техники для обработки результатов [4].

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, позволяют сделать выводы о практической возможности использования метода собственного излучения не только для определения технического состояния цифрового блока но и для локализации неисправных РЕК в составе цифрового блока.

Постановка задачи. Процесс локализации неисправности связан с определением неисправного РЕК путем регистрации и обработки диагностического параметра - теплового отклика на входные тестовые последовательности, разработанной для данного РЕК. Использование метода собственного излучения требует создания новых диагностических моделей, которые отображают связь ДП с физико-химическими процессами, происходящими в РЕК. Для построения модели переноса тепла от "разогретого" кристалла полупроводника на поверхность РЕК (задача нестационарной теплопроводности) необходимо провести анализ технологии изготовления РЕК и структуры современного полупроводникового РЕК.

Технология производства полупроводника базируется на прецизионных процессах обработки: фото- и электролитография, оксидирование, ионноплазменное распыливание, ионная имплантация, диффузия, термокомпрессия и т.д.

Последовательность изготовления планарного полупроводника в составе ИМС состоит из следующих этапов [8]:

- подготовка полупроводниковых пластин;
- создание топологического рисунка;
- "выращивание" $p-n$ -переходов;
- присоединение электрических выводов;
- сборка и герметизация.

На первом этапе, эпитаксиальные структуры, например $n-n+$ -типа, или монокристаллические подкладки с электропроводностью n - или p -типа, подвергают очищению.

Следующий этап – создание топологической картины. Для того чтобы сформировать области с электропроводностью p -типа, необходимо обеспечить проведение локальной диффузии через окна в защитной маске из пленки диоксида кремния SiO_2 толщиной 0,3–1,0 мкм. Размеры этих окон задают с помощью процесса фотолитографии. На пленку наносится пласта фоторезиста и экспонируется ультрафиолетом. Засвеченные участки фоторезиста проявляются и пленку SiO_2 удаляют.

Путем прецизионного дозирования количества примеси, вводимой в кристалл, получают $p-n$ -переходы. При создании области p -базы – используют процесс ионной имплантации, которая состоит во

внедрении ускоренных ионов в поверхность кристалла. Чтобы сформировать базовую область и $p-n$ -перехода коллектор – база на необходимой глубине, используют дальнейший диффузный разгон внедренных атомов бора. В результате формируется область базы с глубиной 2–3 мкм.

Для присоединения к областям эмиттера, базы и коллектора электрических выводов, металлизуют поверхности контактов. Удаляется пленка диоксида с нужных участков. Термическим выпариванием в вакууме, на всю поверхность пластины наносится слой металла (например, алюминия) толщиной до 1 мкм. Многослойная структура МДП транзистора в составе ИМС представлен на рис. 1.

Следующий этап – сборник и герметизация. Подготовленная к сборке пластина содержит значительное количество (десятки тысяч отдельных элементов). Пластины разрезают на отдельные структуры – кристаллы, монтируют на держатель, осуществляют разводку – формирование электрических выводов с контактами и герметизируют.

Герметизация (создание вокруг кристаллу герметичной, механически крепкой оболочки) предназначена для защиты кристалла полупроводника с сформированной на нем структурой, от влияния окружающей среды. Оболочка создается путем оболочивания основы корпуса, с расположенным на нем полупроводниковым кристаллом, пластмассой.

Для создания пластмассового корпуса используют разные пластические материалы: проливные компаунды и пресс порошки на основе эпоксидных, кремний органических и полиэфирных смол. Корпуса (внешние геометрические размеры) современных РЕК стандартизированы. Анализ размеров РЕК необходим для моделирования структуры теплового поля вокруг РЕК.

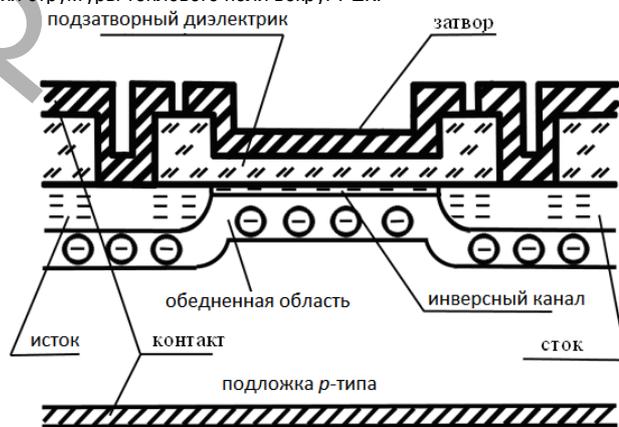


Рис. 1. Многослойная структура МДП транзистора в составе ИМС

Анализ технологии изготовления современных полупроводниковых РЕК показал их многослойную конструкцию. В упрощенном виде это: держатель кристалла, подкладка с "выращенным" РЕК и герметичная, механически крепкая оболочка.

Решение задачи нестационарной теплопроводности в многослойном объекте (РЕК) состоит в определении величин теплофизических характеристик слоев по заданным временным зависимостям температур у поверхности РЕК и температуры самой поверхности.

Полученной задаче отвечает одномерная прямая задача нестационарной теплопроводности.

Сформулируем задачу. Представим РЕК как многослойный объект, изображенный на рис. 2. Ориентируем ось Z перпендикулярно границам между слоями РЕК (перпендикулярно его поверхности), а оси X и Y – параллельно ей. Точку отсчета $(0,0,0)$ разместим на одну

з поверхностей многослойной конструкции (внутренняя поверхность). Ось Z направим к противоположной стороне конструкции (внешняя поверхность). Для справедливости одномерного приближения необходимо, чтобы размер объекта в плоскости (XY) (длина и ширина РЕК), превышал размер вдоль оси Z (высота РЕК).

Температуры поверхностей РЕК изменяются со временем в зависимости от тепловых потоков, которые проходят через данные поверхности.

Уравнение теплопроводности [5]:

$$C(z)\rho(z) = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \lambda(z) \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2}$$

перепишем в виде:

$$T(z,t) = \int_0^t C(z)\rho(z) dt,$$

где $T(z,t)$ – зависимость температуры от координаты Z и времени t

$C(z)$ – теплоёмкость;

$\rho(z)$ – плотность;

$\lambda(z)$ – коэффициент теплопроводности – значения теплофизических характеристик материала слоев исследуемого РЕК.

Теплофизические характеристик материалов слоев считаются постоянными внутри каждого из слоев. Значение этих функций, на соответствующих участках обозначим: C_n , ρ_n и λ_n .

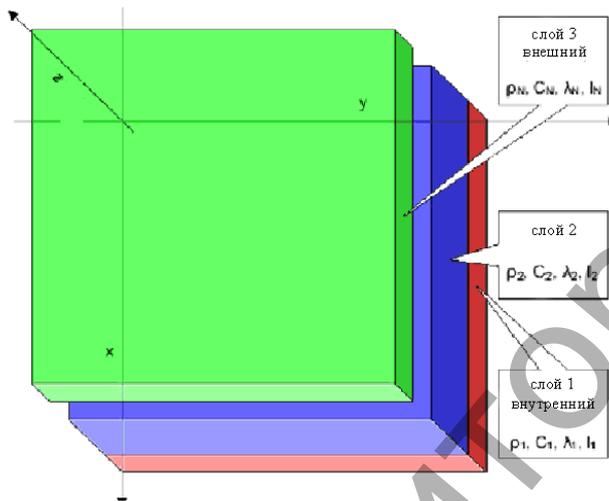


Рис. 2. Многослойный объект

Источником энергии, в многослойной структуре РЕК, является разогретый кристалл p - n -перехода.

Температура кристалла T определяется в соответствии с диагностической моделью p - n -перехода для метода собственного излучения, что основывается на анализе вольт-амперной характеристики (ВАХ) перехода [6]:

$$T = \frac{U - \Phi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \frac{I}{I_{00}} - \epsilon_3}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана;

T – температура;

q – заряд электрона.

I_{00} – величина, независящая от температуры;

Φ_T – температурный потенциал.

Φ_{30} – ширина запрещенной зоны при нулевой температуре;

ϵ_3 – температурная чувствительность.

Выражение (1) позволяет определить температуру кристалла полупроводника в зависимости от тока через p - n -переход и физико-химических свойств полупроводника.

Подставив в (1) значение тока через p - n -переход [7]:

$$I = -\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2,$$

получим математическую модель температурной зависимости p - n -перехода:

$$T = \frac{U - \Phi_{30}}{\frac{k}{q} \ln \left(\frac{-\frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{csch} \frac{W}{L_n} n_1 + \frac{2qD_n}{L_n} S'_n \operatorname{cth} \frac{W}{L_n} n_2}{I_{00}} \right) - \epsilon_3}, \quad (2)$$

где W – ширина базы;

L_n – длина диффузионного смещения электронов в базе;

граничные условия

$$n_1 = n_p^0 (e^{\lambda U_{be}} - 1); \quad n_2 = n_p^w (e^{\lambda U_{bc}} - 1);$$

n_p^0 , n_p^w – концентрации в базе на границе эмиттерного та коллекторного перехода соответственно;

U_{be} , U_{bc} – напряжения, приложенные к эмиттерному и коллекторному переходам соответственно;

S – площадь полупроводника;

D_n – коэффициент концентрации электронов;

Выражение (2) является математической моделью зависимости температуры кристалла p - n -перехода.

Полученная модель позволяет определить нагрев кристалла полупроводника, или количество тепла, как диагностическое параметр процессов происходящих в РЕК.

Заключение. Таким образом, рассмотрена технология изготовления и структура РЕК, для постановки и решения задачи нестационарной теплопроводности многослойной структуры. Начальную температуру T определяет "разогретый", под действием проверочных тестов, кристалл полупроводника. Температура, в соответствии с диагностической моделью, зависит от тока I и физико-химических процессов происходящих в РЕК.

Направлением дальнейших исследований является анализ механизма передачи тепла от "разогретого" кристалла p - n -перехода на "поверхность" РЕК.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вавилов, В.П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1984. – 162 с.
2. Концевой, Ю.А. Методы контроля технологии производства полупроводниковых приборов / Ю.А. Концевой, В.Д. Кудин. – М.: Энергия, 1973. – 140 с.
3. Данилин, Н.С. Теория и методы неразрушающего инфракрасного контроля радиоэлектронных схем / Н.С. Данилин, О.Д. Бакланов, Ю.И. Загорский. – М.: Изд МО СССР, 1974. – 164 с.
4. Кузавков, В.В. Застосування методу власного випромінювання для технічної діагностики радіоелектронних блоків: збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості / В.В. Кузавков, О.Г. Янковський – О.: ОДАТРЯ, 2014. – Вип. №9. – С. 30–37.
5. Лебедев, Н.Н. Сборник задач по математической физике / Н.Н. Лебедев, И.П. Скальская, Я.С. Уфлянд. – М.: Гостехтеориздат, 1955 (переиздано в США в 1965 году).
6. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х книгах. – Кн. 2; пер. с англ.- 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
7. Кузавков, В.В. Діагностична модель p - n (n - p) переходу в динамічному режимі для безконтактного індукційного методу діагностування Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2014. – Вип. № 45. С. 41–47.

Материал поступил в редакцию 06.02.15

KUZAVKOV W.V. Solution to the problem of non-stationary heat conduction in the radio-electronic components

A feature of the method of self-radiation for electronics products have a direct link resource of radio-electronic components (REC) with their temperature. Operational methods of its own radiation evident in the study of large number of similar elements as digital thermal fields the same products are well correlated. Diagnostic parameter (DS) while checking the technical state, formed in accordance with the method of heat transfer (heat conduction, convection, thermal radiation), and may be represented not only by a set of numerical values, but also in the form of two-dimensional (three-dimensional) thermograms. After the formation of a set of informative features can be applied pattern recognition algorithms.

Analysis of the possibilities of the method of its own radiation showed the possibility of a high-performance noncontact diagnostics using computer technology to process the results.

Theoretical and experimental studies allow to draw conclusions about the feasibility of using the method of self-radiation not only to determine the technical condition of the digital block and to localize the faulty rivers make digital unit.

Fault localization process involves determining faulty RIVERS by recording and processing of diagnostic parameter - the thermal response to the input test patterns developed for the OBS. The use of self-radiation requires the creation of new diagnostic models that display DP connection with physical and chemical processes that occur at the RJC. To construct a model of heat transfer from the "heated" crystal semiconductor on the surface of rivers (the problem of non-stationary heat conduction) is necessary to analyze technology of rivers and structure of modern semiconductor RIVERS.

УДК 681.35

Кузавков В.В., Четверкина Г.А.

ПОСТРОЕНИЕ ПРОВЕРОЧНЫХ ТЕСТОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИНДУКЦИОННОГО МЕТОДА

Введение. Современные объекты радиоэлектронной техники (РЭТ) представляют собой сложные технические системы, которые являются объединениям модулей разного физического выполнения и назначения. Широкая номенклатура цифровых устройств используемых в объектах РЭТ, их многофункциональность, предъявляют жесткие требования к средствам диагностирования с точки зрения обеспечения заданной продолжительности диагностирования, при обеспеченные необходимой достоверности [1]. Обеспечить выдвинутые требования можно применением новых эффективных принципов, методов и средств диагностирования объектов РЭТ.

Анализ состояния проблемы. В состав современных объектов РЭТ входят цифровые блоки состоящие из радиоэлектронных компонентов (РЭК). Проведение качественного контроля технического состояния цифровых радиоэлектронных компонентов зависит от метода диагностирования.

Перспективным методом диагностирования РЭК является бесконтактный индукционный метод диагностирования [2].

Сущность бесконтактного индуктивного метода (в дальнейшем – метода) диагностирования радиоэлектронных блоков заключается в том, что в качестве диагностических параметров (ДП) используются параметры сигналов, которые наводятся токопроводящим элементом на зажимах измерительной катушки, при подаче на вход радиоэлектронного блока тестового воздействия.

Под токопроводящим элементом понимается провод питания радиоэлектронного блока (положительный или корпусной). Работа радиоэлектронного блока сопровождается изменением магнитного поля вокруг проводов питания при подаче диагностического теста.

Данное свойство целесообразно использовать для определения технического состояния радиоэлектронного блока (радиоэлектронного компонента – РЭК). Для этого измерительная катушка закрепляется "одевается" на токопроводящий элемент. При подаче диагностического теста в радиоэлектронном блоке происходит срабатывание составных компонентов, что приводит к изменению сигнала – магнитного поля на токопроводящем элементе. На зажимах измерительной катушки генерируется сигнал с определенными параметрами. Наличие и форма сигнала на измерительной катушке служит информацией о факте работы радиоэлектронного блока. Диагностическая информация, полученная с помощью измерительной катушки, поступает в блок ее обработки. На основе сравнения параметров эталонных и полученных сигналов, принимается решение о техническом состоянии данного устройства.

Информацией о работоспособности РЭК для бесконтактного ин-

дукционного метода есть характеристики сигналов, которые наводятся в индукционном датчике (датчике диагностического сигнала – ДДС).

Поступление на входы РЭК тестовой последовательности (ТП) \tilde{X}_i вызывает срабатывание данного элемента в соответствии с реализованной в нем функцией. При этом на ДДС возникает соответствующая последовательность сигналов (откликов) $\tilde{Y}_{k,i}$. Если входная последовательность \tilde{X}_i содержит функциональный проверочный тест (ФПТ), то суммарный отклик РЭК $\tilde{Y}_{k,i}$ может быть представлен в виде последовательности откликов элементов на ФПТ $\tilde{Y}_{фпт,i}$ и избыточных наборов $\tilde{Y}_{нд,i}$. Этот суммарный отклик является эталонным $\tilde{Y}_{к,и.эт}$ в случае полностью исправного РЭК.

В тестовой последовательности, которая подается на цифровой блок, предполагается наличие ФПТ для всех его элементов с помощью которых определяется эталонный отклик. Это означает, что входная ТП должна быть детерминированной.

Дефект в логическом элементе интегральной схемы приводит к тому, что элемент прекращает переключаться (на его выходе фиксируется постоянный - константный уровень "0" или "1") или изменяется его функция переключения. Из-за отсутствия срабатываний РЭК, значение параметров на ДДС изменится, т.е. $\tilde{Y}_{k,i} \neq \tilde{Y}_{к,и.эт}$. При этом изменяются Булевы функции, реализованные в цифровом блоке.

Условие проявления дефекта на выходах РЭК автоматически трансформируется в условие проявления дефекта на ДДС. Благодаря этому, любой дефект, который возникает в РЭК, проявится в изменении отклика $\tilde{Y}_{k,i}$ этого РЭК.

Построение частных проверочных тестов для логических элементов интегральных схем.

Радиоэлектронный компонент комбинационного типа [3, 4], который имеет n входов, характеризуется тем, что значение логического сигнала на его выходе в произвольный момент времени однозначно определяется совокупностью сигналов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на входах в тот же момент времени. Любой РЭК полностью может быть описанный логической (Булевой) функцией типа $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, а тестовые наборы для проверки РЭК могут подаваться в произвольном порядке. Задача построения частных ПТ для РЭК сводится к нахождению такого минимального числа тестовых наборов, на котором проявляется любой дефект заданного класса.

Четверкина Галина Андреевна, старший преподаватель кафедры ЭВМиС Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика