

ASYMPTOTIC PROBABILISTIC GENETIC ALGORITHM

This paper proposes the modification of probabilistic genetic algorithm, which uses genetic operators, influencing not particular solutions, but the probabilities distribution of solution vector components. This paper also compares reliability and efficiency of the basic algorithm and proposed modification using the set of test functions and the bank credit portfolio formation problem.

Keywords: probabilistic genetic algorithm, mutation, selection.

© Галушин П. В., Семенкин Е. С., 2009

УДК 621.317.799

В. М. Владимиров, Э. Ф. Гринин, М. Е. Сергей, В. Н. Шепов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ЧЕТЫРЕХЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ*

Разработан автоматизированный измеритель удельного электросопротивления монокристаллического кремния четырехзондовым методом.

Ключевые слова: автоматизированный измеритель, монокристаллический кремний, удельное электросопротивление, четырехзондовый метод.

Современный уровень производства и анализа качества монокристаллического кремния требует разработки измерителей удельного электросопротивления (УЭС) нового поколения, позволяющих проводить измерения УЭС в автоматическом режиме, с высокой скоростью и точностью. Из всех методов измерения УЭС монокристаллического кремния только четырехзондовый метод признан Международной организацией по полупроводниковому оборудованию и материалам (Semiconductor Equipment & Materials International, SEMI) в качестве арбитражного. Данный метод рекомендован и российским ГОСТ 19658–81 [1].

На основе требований к оборудованию и методикам измерения и расчета УЭС системы международных стандартов SEMI** авторами разработан прибор «Рометр», предназначенный для автоматизированного измерения УЭС пластин и слитков монокристаллического кремния четырехзондовым методом.

Конструкция прибора «Рометр». Прибор состоит из следующих основных функциональных элементов (рис. 1): четырехзондовой головки с линейным расположением зондов; двух источников питания (один – для измерительной схемы, второй – для питания шаговых двигателей); калиброванного источника тока для внешних зондов че-

тырехзондовой головки; двух микроконтроллеров (один – для управления работой измерительной схемы, второй – для управления перемещением четырехзондовой головки и столика с образцом); аналого-цифрового преобразователя (АЦП); аналоговых эквивалентов; измерительного усилителя; датчика температуры; схемы управления двигателями (СУД); датчика углового перемещения столика; датчика рабочего положения четырехзондовой головки.

В приборе применена четырехзондовая головка фирмы Jandel Engineering Ltd с межзондовым расстоянием 1,59 мм, которая обеспечивает подачу на измеряемый образец постоянного тока заданной величины по внешним зондам и измерение возникающей разности потенциалов на внутренних зондах, к которым подключен измерительный усилитель. С выхода усилителя аналоговый сигнал подается на вход 18-разрядного АЦП MAX132 и преобразуется в цифровой код, далее он поступает на вход первого микроконтроллера ATMEGA8, управляющего работой измерительной схемы, и затем на персональный компьютер. Источник стабилизированного питания измерительной схемы обеспечивает стабильные постоянные напряжения +15 и –15 В для работы измерительного усилителя, источника тока, АЦП и +5 В для пер-

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы Сибирского отделения Российской академии наук «Импортозамещение».

** SEMI MF84. Standard Test Methods for Measuring Resistivity of Silicon Wafers With an In-Line Four-Point Probe; SEMI MF81. Standard Test Methods for Measuring Radial Resistivity Variation on Silicon Slices; SEMI MF1527. Standard Guide for Application of Silicon Standard Reference Materials and Reference Wafers for Calibration and Control of Instruments for Measuring Resistivity of Silicon.

вого микроконтроллера и датчика температуры. Второй стабилизированный источник питания вырабатывает напряжение +10 В для питания шаговых двигателей и +5 В для питания второго микроконтроллера ATMEGA8 и СУД. Эти источники питания выполнены в отдельных экранированных корпусах для уменьшения влияния помех на измерительный усилитель.

Источник тока для четырехзондовой головки предназначен для выработки дискретно перестраиваемых значений постоянного тока 0,25; 2,5; 25; 250 мкА; 2,5; 25; 100 мА с возможностью коммутации полярности. Каждое значение тока задается в соответствующем диапазоне измеряемых величин УЭС согласно стандарту SEMI MF84. В режиме измерений ток через внешние зонды четырехзондовой головки подается на измеряемый образец, а в режиме калибровки – на аналоговые эквиваленты – семь прецизионных резисторов (10 000; 1 000; 100; 10; 1; 0,1; 0,01 Ом), подключенных в режиме калибровки к источнику тока через резисторы, имитирующие переходное сопротивление между каждым наконечником зонда и образцом кремния.

Контроль температуры пластин и слитков монокристаллического кремния обеспечивается датчиком температуры DS1820, выходной сигнал с которого поступает на вход первого микроконтроллера. СУД подает импульсы напряжения питания на обмотки шаговых двигателей в нужной последовательности для обеспечения вращения в прямом или реверсном направлении по командам второго микроконтроллера. В приборе «Рометр» применены шаговые двигатели типа ДШИ-200-1. Датчик углового перемещения ЛИР458А контролирует угол поворота подвижной части столика с образцом кремния относительно четырехзондовой головки. Выходной сигнал

датчика в цифровом коде поступает на второй микроконтроллер. Концевые выключатели вертикального (КВВП) (верхний и нижний) и горизонтального перемещений (КВП) (передний и задний) передают контрольные сигналы на второй микроконтроллер в моменты, когда положение четырехзондовой головки или измерительного столика достигло крайних значений. Оптронный датчик рабочего положения четырехзондовой головки АОТ 147-А подает контрольный сигнал на второй микроконтроллер, когда давление зондов на образец достигает величины, рекомендованной в стандарте SEMI MF84.

Управляющая программа. Программа, управляющая работой прибора «Рометр», состоит из четырех подпрограмм, позволяющих проводить измерения УЭС монокристаллического кремния в четырех режимах: измерение УЭС в одной точке заданное количество раз; измерение УЭС в шести точках согласно стандарту SEMI MF81 (вариант В); измерение карты сопротивлений согласно стандартам SEMI MF81 и MF1527; измерение УЭС объемных нестандартных образцов. Управляющая программа позволяет в автоматическом режиме провести калибровку прибора по аналоговым эквивалентам, измерить толщину пластины или слитка кремния, задать необходимую величину тока на внешних зондах четырехзондовой головки, измерить разность потенциалов между внутренними зондами и рассчитать значение УЭС по методике, приведенной в стандарте SEMI MF84 с учетом поправочных коэффициентов на геометрию образца и его температуру. Протокол измерений УЭС отображается в окне программы, что позволяет контролировать значения УЭС в процессе измерения.

Прибор «Рометр» работает следующим образом. После запуска управляющей программы с платы СУД

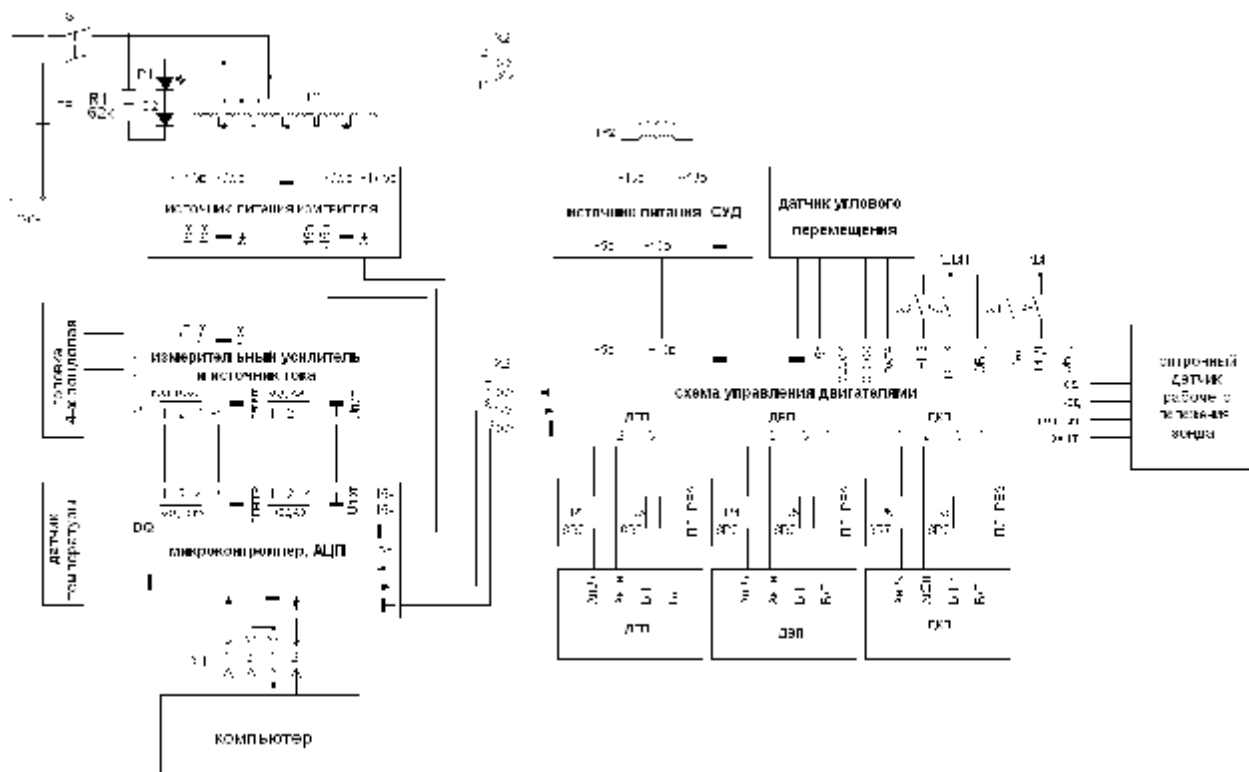


Рис. 1. Блок-схема прибора «Рометр»

подается сигнал на двигатели вертикального (ДВП), горизонтального (ДГП) и кругового (ДКП) перемещений для установки четырехзондовой головки и подвижной части столика прибора в исходное положение. Исследуемые образцы монокристаллического кремния круглой формы зажимаются фиксаторами так, что их центр совпадает с центром четырехзондовой головки. Далее выполняется автоматическая калибровка прибора. Для этого по команде управляющей программы четырехзондовая головка отключается от источника тока и измерительного усилителя. Вместо нее подключается ее аналоговый эквивалент, через который пропускается ток заданной величины и измеряется падение напряжения на нем при чередовании полярности тока. После процесса калибровки к входам источника тока и измерительного усилителя вместо аналогового эквивалента автоматически подключается четырехзондовая головка. Далее манипулятор вертикального перемещения плавно опускает эту головку на измеряемый образец до соприкосновения зондов с поверхностью образца. В зависимости от выбранного режима измерений автоматически выполняется измерение УЭС и температуры образца и учитывается температурный поправочный коэффициент согласно стандарту SEMI MF84.

Управляющая программа позволяет определить УЭС в любой точке трехмерного изображения поверхности пластины при наведении на нее курсора, а также анализировать распределение УЭС по сечению поверхности, проходящему через ее центр (рис. 2).

Технические характеристики. Габаритные размеры прибора «Рометр» 560 × 320 × 410 мм. Вес – не более 25 кг. Диапазон измерения удельного электрического сопротивления составляет от 0,001 до 10 000 Ом · см. Пределы допускаемой основной относительной погрешности среднего арифметического из 10 измерений: для УЭС в диапазоне 0,001...0,01 Ом · см – не более ±3 %; для УЭС в диапазоне 0,011...10 000 Ом · см – не более ±2 %. Размер измеряемых образцов монокристаллического кремния: диаметр – от 10 до 200 мм, толщина – от 0,1 до 30 мм.

Таким образом, разработанный автоматизированный измеритель УЭС пластин и слитков монокристаллического кремния по своим техническим характеристикам не уступает лучшим зарубежным аналогам. Определенные по результатам сертификационных испытаний пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений не превышают значений, приведенных в ГОСТ 19658–81 и стандартах SEMI MF84, MF81, MF1527.

Прибор прошел сертификацию, в соответствии с которой утверждён тип измерителей удельного электросопротивления кремния «Рометр», зарегистрированный в Государственном реестре средств измерений, и допущен к применению в Российской Федерации.

Библиографический список

1. ГОСТ 19658–81. Кремний монокристаллический в слитках. М. : Изд-во стандартов, 1990.

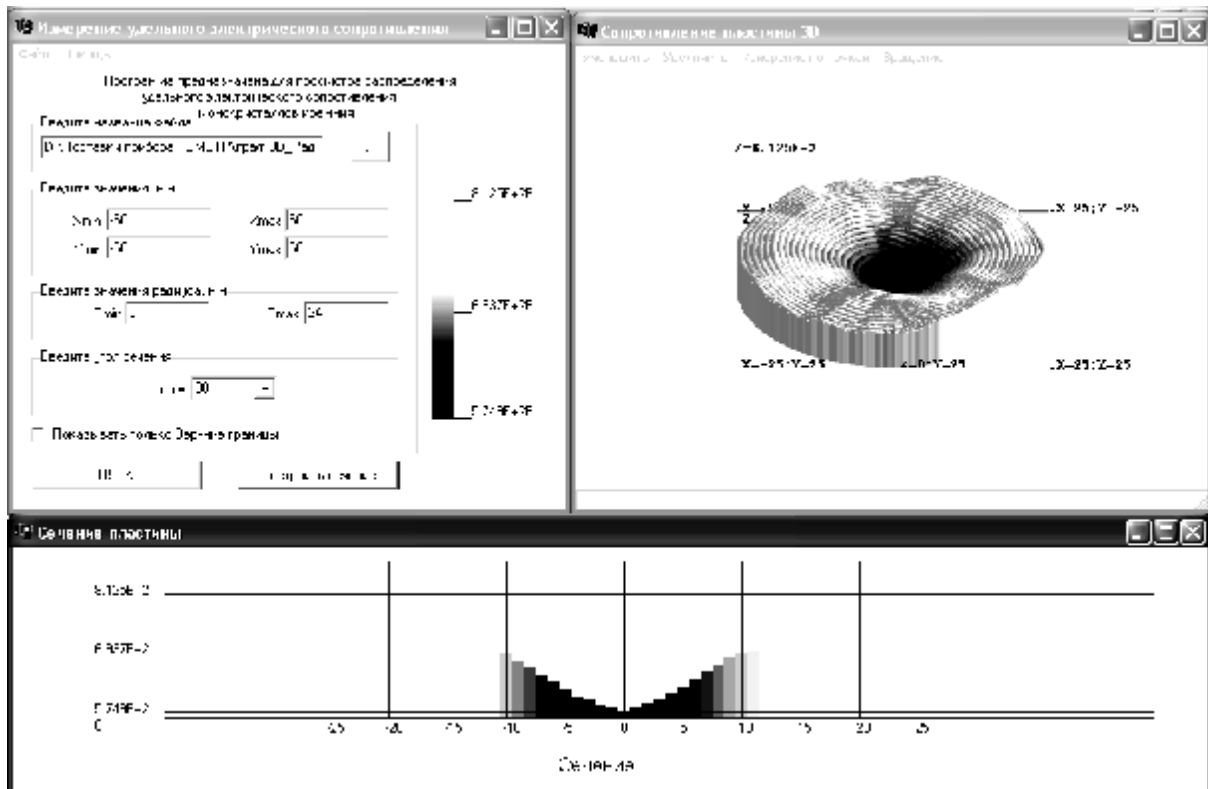


Рис. 2. Результаты измерений карты сопротивлений пластины монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского

V. M. Vladimirov, E. F. Grinin, M. E. Sergiy, V. N. Shepov

AUTOMATIC DEVICE FOR MEASURING RESISTIVITY OF SILICON FOUR-POINT PROBE METHOD

An automatic device for measuring the resistivity of single-crystalline silicon by means of the four-point probe method had been developed.

Keywords: automatic device, single-crystalline silicon, resistivity, four-point probe method.

© Владимирова В. М., Гринин Э. Ф., Сергий М. Е., Шепов В. Н., 2009

УДК 519.622

А. Е. Новиков, Е. А. Новиков

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛА ЦЕЗИЯ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ L-УСТОЙЧИВЫМ МЕТОДОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ*

Описан алгоритм формирования правой части и матрицы Якоби дифференциальных уравнений химической кинетики. Численное моделирование цикла цезия в верхней атмосфере проведено посредством L-устойчивого метода второго порядка с контролем точности вычислений. Приведены результаты расчетов.

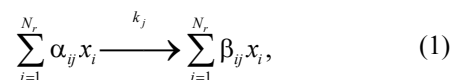
Ключевые слова: химическая кинетика, цикл цезия, жесткая задача, L-устойчивый метод, контроль точности.

Моделирование кинетики химических реакций применяется при исследовании разнообразных химических процессов. Особое внимание при этом уделяется изучению временных зависимостей концентраций реагентов, которые являются решением задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Трудности решения таких задач связаны с жесткостью и большой размерностью.

Современные методы решения жестких задач используют обращение матрицы Якоби системы уравнений. В случае большой размерности исходной задачи декомпозиция такой матрицы практически полностью определяет общие вычислительные затраты. Для повышения эффективности расчетов в ряде алгоритмов используется замораживание матрицы Якоби, т. е. применение одной матрицы на нескольких шагах интегрирования [1; 2]. Наиболее успешно этот подход применяется в алгоритмах на основе многошаговых методов и, в частности, в формулах дифференцирования назад [3]. Однако использование данного подхода в алгоритмах интегрирования на основе известных безытерационных методов, к которым относятся методы типа Розенброка и их различные модификации, связано с определенными трудностями [1]. Ниже будет приведен алгоритм формирования правой части и матрицы Якоби дифференциальных уравнений химической кинетики, а также результаты численного моделирования ионизационно-деионизационного цикла цезия в верхней атмосфере L-устойчивым методом второго порядка точности, в ко-

тором допускается замораживание как численной, так и аналитической матрицы Якоби.

Кинетическая схема химической реакции состоит из элементарных стадий, записываемых в виде [4]



где x_i , $1 \leq i \leq N_r$ – реагенты; k_j , $1 \leq j \leq N_s$ – константы скоростей стадий; N_r и N_s – число реагентов и число стадий в реакции соответственно; α_{ij} и β_{ij} , $1 \leq i \leq N_r$, $1 \leq j \leq N_s$ – стехиометрические коэффициенты.

Процессу (1) в рамках сосредоточенной модели изотермического реактора постоянного объема соответствует система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$C' = A^T V \quad (2)$$

с заданным начальным условием $C(0) = C_0$. Здесь A^T – стехиометрическая матрица, C и V – векторы концентраций реагентов и скоростей стадий соответственно. В случае протекания реакции в неизотермических условиях к системе (2) добавляется уравнение теплового баланса

$$T' = [Q^T V - \alpha(T - T_{01})]/C_V^T C, \quad (3)$$

где T – температура смеси в реакторе; T_{01} – температура стенок реактора; Q^T – вектор удельных теплот стадий; C_V^T – вектор теплоемкостей реагентов; $\alpha = \alpha s/r$, здесь α – коэффициент теплоотдачи; s и r – площадь поверхности и объем реактора соответственно. Верхний индекс T у векторов Q^T и C_V^T означает транспонирование. Теплоемкости реагентов и коэффициент теплоотдачи могут быть

* Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 08-01-00621 и Президента НШ-3431.2008.9