

Анализ приведенных результатов показывает, что использование структуры пиксела-приемника, элементы которой выполнены в виде колец, позволяет получить пороговую чувствительность, сравнимую с шумовыми флуктуациями исследуемых объектов при уменьшении их объема и теплоемкости [3]. Регистрируемый контраст температур при использовании современных фотоприемников достигает  $1,3 \cdot 10^{-3}$  К [6]. С другой стороны, тепловая релаксация предлагаемой структуры чувствительного элемента не накладывает ограничения на частоту считывания информации.

Рассмотренный пиксел-приемник ИК-излучения может быть положен в основу современных разрабатываемых кремниевых неохлаждаемых интегральных тепловизионных систем. Основные ожидаемые параметры одного элемента такой матрицы следующие: частота считывания 40 Гц; диапазон длин волн входного ИК-излучения 10—20 мкм; энергия ИК-излучения  $(0,2—5) \cdot 10^{-11}$  Дж; пространственное разрешение 25 мкм.

Кольцеобразное выполнение чувствительных элементов рассматриваемой структуры обеспечивает высокую спектральную избирательность микрорезонаторной интегральной матрицы, а использование оптического считывания информации позволяет исключить влияние электромагнитных наводок.

#### Литература

1. Сысоева С. Актуальные технологии и применение датчиков автомобильных систем активной безопасности. Инфракрасные тепловые камеры // Компоненты и технологии. 2006. № 11. С. 23.

2. Белоусов Ю. И. Требования к перспективным фотоприемным устройствам ИК-диапазона // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 89.

3. Таубкин И. И., Тришенков М. А. Предельные значения чувствительности тепловизоров и информативности систем технического зрения // Прикладная физика. 2001. № 6. С. 48.

4. Пат. 11142 Респ. Беларусь. Преобразователь ИК-изображений исследуемого объекта, спектральный диапазон излучения которого находится в пределах от 2 мкм до 15 мкм в электрический сигнал / В. А. Пилипович и др. // Афіцыйны бюл. 2008. № 5.

5. Мельников А. А. Расчет температурных полей в многослойных фотоприемных структурах // Нано- и микросистемная техника. 2000. № 2. С. 21.

6. Пилипович В. А. и др. Матричное микрорезонаторное ИК фотоприемное устройство // Лазерная физика и оптические технологии: Сб. науч. тр. VII Междунар. науч. конф. Минск: Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 2008. Т. 3. С. 410.

7. Образцов А., Тимошенко В., Окуши Х. Сравнительное исследование оптических свойств пористого кремния и оксидов SiO и SiO<sub>2</sub> // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 3. С. 322.

8. Синцов В. Н. Исследование свойств золотой черни // ЖПС. 1966. Т. 4. Вып. 6. С. 503.

9. Синцов В. Н. Тепловые приемники излучения: Тр. I Всесоюз. симп. Киев: Наукова думка, 1967. С. 164.

Дата принятия 14.01.2010 г.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.799

### Прибор для измерения удельного электрического сопротивления монокристаллического кремния четырехзондовым методом

В. М. ВЛАДИМИРОВ, Э. Ф. ГРИНИН, М. Е. СЕРГИЙ, В. Н. ШЕПОВ

Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, Россия, e-mail: vlad@ksc.krasn.ru.

Описан новый прибор, позволяющий в автоматическом режиме измерять распределение удельного электрического сопротивления по поверхности пластины монокристаллического кремния диаметром до 200 мм. Измерение основано на четырехзондовом методе.

**Ключевые слова:** удельное электрическое сопротивление, монокристаллический кремний, четырехзондовый метод.

The new instrument, designed to measure the electroresistivity distribution over the surface of crystal silicon with 200 mm diameter, is described. The measurement is based on four-point probe method.

**Key words:** electroresistivity, single crystal silicon, four-point probe method.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) — один из основных параметров, контролируемых в монокристаллическом кремнии. Применяемый для этой цели четырех-

зондовый метод признан Международной организацией SEMI (Semiconductor Equipment & Materials International) арбитражным и рекомендован российским стандартом [1].

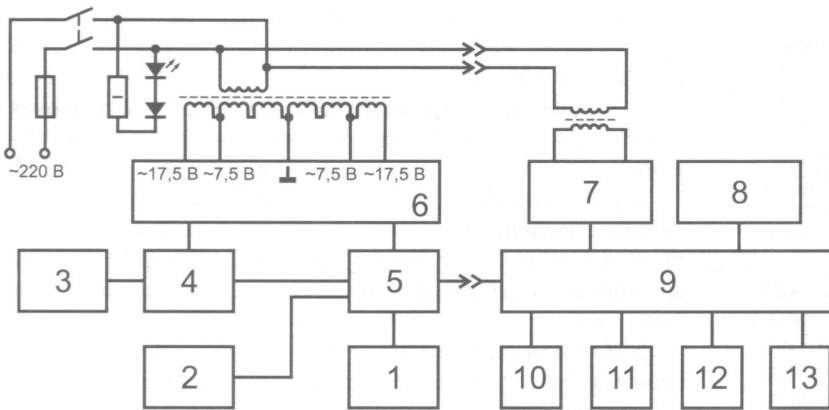


Рис. 1. Структурная схема прибора «Рометр»:

1 — персональный компьютер; 2 — датчик температуры; 3 — четырехзондовая головка; 4 — модуль, содержащий источник тока и измерительный усилитель; 5 — плата управления с микроконтроллером и аналого-цифровым преобразователем; 6 — источник питания измерителя; 7 — источник питания схемы управления шаговыми двигателями; 8 — датчик углового перемещения измерительного столика; 9 — схема управления шаговыми двигателями; 10 — оптронный датчик рабочего положения четырехзондовой головки; 11, 12, 13 — двигатели соответственно горизонтального перемещения подвижной части измерительного столика, вертикального перемещения четырехзондовой головки, кругового вращения подвижной части измерительного столика

Часто при анализе качества монокристаллического кремния необходимо измерить УЭС не только в центре и на краях изготовленных пластин, но также получить информацию о его распределении по всей поверхности пластины. Известны зарубежные приборы, позволяющие проводить такие измерения в автоматическом режиме, например [2, 3].

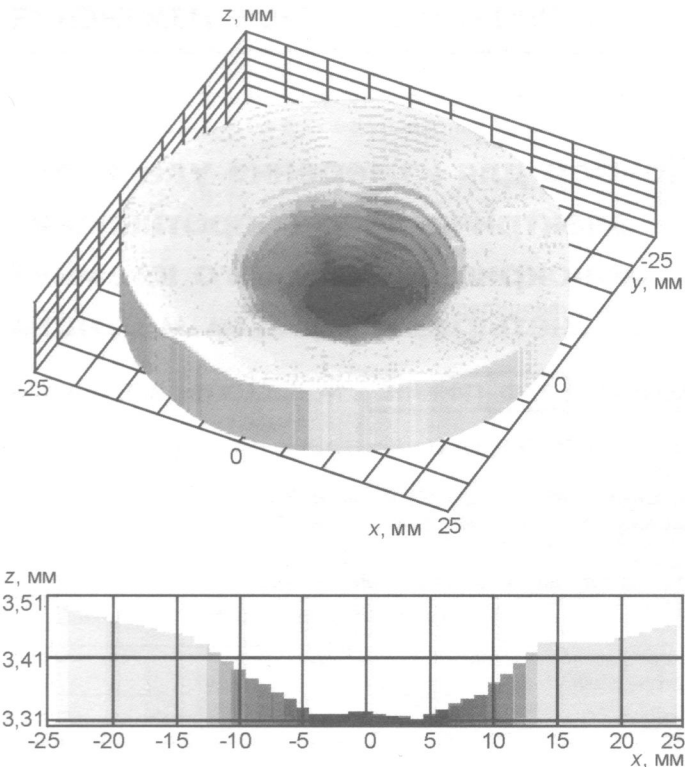


Рис. 2. Результаты измерений карты сопротивлений пластины монокристаллического кремния

Ниже описан новый прибор для автоматизированного измерения распределения УЭС по поверхности пластин монокристаллического кремния четырехзондовым методом, в котором учтены требования международных стандартов SEMI [4—6] и который не уступает по своим техническим характеристикам зарубежным аналогам.

На рис. 1 приведена структурная схема разработанного прибора «Рометр». Прибор содержит четырехзондовую головку с линейным расположением зондов фирмы Jandel Engineering Ltd. с межзондовым расстоянием 1,59 мм. Она обеспечивает подачу на измеряемую пластину заданного постоянного тока по внешним зондам и измерение возникающей разности потенциалов на внутренних зондах, к которым подключен измерительный усилитель. С выхода усилителя аналоговый сигнал поступает на 18-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) MAX132. Далее цифровой код подается на микроконтроллер ATMEGA8, управляющий работой измерительной схемы, и затем на персональный компьютер.

Чтобы уменьшить влияние помех на измерительный усилитель, в приборе «Рометр» использованы два блока питания: один для схемы управления шаговыми двигателями, другой для измерительного усилителя и стабилизированного источника тока. Последний обеспечивает следующие дискретные значения постоянного тока: 0,25, 2,5, 25, 250 мкА; 2,5, 25, 100 мА с коммутацией полярности. Нестабильность постоянного тока во время калибровки прибора и измерений УЭС не превышает  $\pm 0,01\%$ . Сила тока устанавливается автоматически в зависимости от диапазона измеряемых значений УЭС согласно [4]. В режиме измерений электрический ток через внешние зонды четырехзондовой головки подается на измеряемый образец, а в режиме калибровки — на аналоговые эквиваленты, т. е. на семь прецизионных резисторов сопротивлениями 10000, 1000, 100, 10, 1, 0,1, 0,01 Ом. Аналоговые эквиваленты в режиме калибровки подключаются к источнику тока через резисторы, имитирующие переходное сопротивление между наконечником каждого зонда и пластиной кремния. Сопротивление этих резисторов в 300 раз превышает сопротивление соответствующих аналоговых эквивалентов. Температура пластины контролируется датчиком DS1820.

Импульсы напряжения питания поступают на обмотки шаговых двигателей в нужной последовательности для обеспечения вращения в прямом или реверсном направлении. В приборе применены шаговые двигатели типа ДШИ-200-1. Датчик углового перемещения ЛИР458А контролирует угол поворота подвижной части столика с пластиной кремния относительно четырехзондовой головки. С концевых выключателей вертикального (верхний, нижний) и горизонтального (передний, задний) перемещений подаются контрольные сигналы в моменты, когда положение четырехзондовой головки или измерительного столика достигли крайних значений. С оптронного датчика рабочего положения четырехзондовой головки АОТ 147-А подается контрольный сигнал, когда давление зондов на поверхность пластины кремния достигло заданного значения [4].

Автоматизацию калибровки и измерений прибора «Рометр» обеспечивает управляющая программа в системе

Borland C++ Builder. Она состоит из четырех подпрограмм, позволяющих в четырех режимах проводить измерения УЭС различных образцов монокристаллического кремния: пластин и слитков — в одной точке заданное количество раз; пластин — в шести точках в соответствии с [5] (вариант В); распределение по поверхности пластин согласно [5], [6]; объемных нестандартных образцов.

При помощи управляющей программы можно осуществить калибровку прибора по аналоговым эквивалентам, измерить толщину пластины кремния, задать необходимую силу тока на внешних зондах четырехзондовой головки, измерить разность потенциалов между внутренними зондами и рассчитать УЭС по методике, приведенной в [4] с учетом поправочных коэффициентов на геометрию образца и его температуру. Протокол измерений отображается в окне программы, что позволяет контролировать значения УЭС в процессе измерения. Также предусмотрен ручной ввод толщины измеряемых пластин и силы тока, подаваемого на четырехзондовую головку.

Прибор работает следующим образом. После запуска управляющей программы со схемы управления двигателями поступает сигнал на двигатели вертикального, горизонтального и кругового перемещений для установки четырехзондовой головки и подвижной части столика прибора в исходное положение. Измеряемые пластины монокристаллического кремния зажимаются фиксаторами так, что их центры совпадают с центром четырехзондовой головки. Далее выполняется автоматическая калибровка прибора. Для этого по команде управляющей программы четырехзондовая головка отключается от источника тока и измерительного усилителя и вместо нее поочередно подключаются аналоговые эквиваленты. Через них пропускается соответствующий ток и измеряется падение напряжения на каждом эквиваленте при чередовании полярности тока. После калибровки к выходу источника тока и входу измерительного усилителя вместо аналоговых эквивалентов автоматически подключается четырехзондовая головка. Далее манипулятор вертикального перемещения плавно опускает четырехзондовую головку на измеряемую пластину до соприкосновения зондов с ее поверхностью. В зависимости от выбранного режима выполняются измерения УЭС, температуры образца и учитывается температурный поправочный коэффициент согласно [4].

Для повышения точности измерений УЭС в приборе «Ро-метр» реализован режим измерений, при котором в каждой точке соприкосновения четырехзондовой головки с пластиной монокристаллического кремния управляющая программа позволяет задавать от 10 до 1000 измерений УЭС при чередовании полярности тока на внешних зондах головки.

На рис. 2 приведены результаты измерений карты сопротивлений пластины монокристаллического кремния. Управляющая программа позволяет определять УЭС в любой точке трехмерного изображения поверхности пластины при наведении курсора на эту точку, контролировать данные по таблице измерений, а также анализировать распределение УЭС по сечению поверхности (нижний рисунок), проходящему через ее центр.

**Технические характеристики:** диапазон измерения УЭС пластин монокристаллического кремния составляет 0,001—10000 Ом·см; пределы допускаемой основной относительной погрешности среднего арифметического из десяти измерений в диапазоне 0,001—0,01 Ом·см не более  $\pm 3\%$ , в диапазоне 0,011—10000 Ом·см не более  $\pm 2\%$ ; диаметр образцов 10—200 мм (может быть увеличен до 300 мм), толщина 0,1—30 мм; габаритные размеры прибора 560×320×410 мм, масса не более 25 кг.

Разработанный автоматизированный измеритель УЭС пластин и слитков монокристаллического кремния по своим техническим характеристикам не уступает хорошо известным зарубежным аналогам. Определенные по результатам сертификационных испытаний пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений не превышают значений, приведенных в [4—6].

Прибор сертифицирован, утвержден тип измерителей удельного электросопротивления кремния «Ро-метр», который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений (№ 35567-07).

Работа выполнена при финансовой поддержке программы СО РАН «Импортозамещение».

#### Литература

1. **ГОСТ 19658—81.** Кремний монокристаллический в слитках.
2. <http://www.semilab.com> (дата обращения: 30.11.2009).
3. <http://www.jandel.com> (дата обращения: 30.11.2009).
4. **SEMI MF84.** Standard Test Methods for Measuring Resistivity of Silicon Wafers With an In-Line Four-Point Probe.
5. **SEMI MF81.** Standard Test Methods for Measuring Radial Resistivity Variation on Silicon Slices.
6. **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.

Дата принятия 07.12.2009 г.