

## СВЧ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА

А.Н. Новиков, А.В. Юрченко

В статье описаны физические основы СВЧ метрологии (методы, приборы и ошибки) полупроводниковых структурированных фотоматериалов, в том числе возможность тестирования сложных соединений на основе материалов АЗВ5.

**Ключевые слова:** Фотоматериалы, СВЧ методы, автодинные датчики, удельное сопротивление, время жизни, погрешность измерения

### Введение

Исходя из анализа требований к неоднородным фотоматериалам для солнечных элементов, были сформулированы требования методам контроля.

Они должны обеспечивать:

- локальность измерений,
- сканирование по поверхности пластины,
- накопление данных измерений в памяти с последующей обработкой по алгоритму,
- бесконтактность измерений,
- сбор данных полученных различными методами,
- контроль в процессе или после воздействия хотя бы части технологических воздействий.

Из известных [1,6,7.] методов в основу предлагаемой методологии положены зондовые методы:

- а) на стадии отработки технологии материала электронно-зондовые [6],
- б) на стадии контроля материала СВЧ-зондовые с контролем фотопроводимости на различных длинах волн [10],
- в) на стадии технологии формирования солнечного элемента со световым зондом с различной длины волны [12].

Такая методология с измерением интегрированных параметров по площади пластины позволяет наиболее оптимально определить корреляционные зависимости корректировать технологический процесс изготовления.

Наиболее полную информацию о полупроводниковом материале [4,5] можно получить, зная его удельное электрическое сопротивление и время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ). Именно эти параметры несут в себе наиболее важную информацию о качестве материала. Малая величина времени жизни ННЗ, например, свидетельствует о плохом качестве исходного материала или каких-либо других нарушениях технологии производства кристаллического кремния.

Поэтому, при производстве полупроводников необходимы достаточно простые, надежные и дешевые приборы для экспрессного определения удельного сопротивления и времени жизни ННЗ как в порошке, так и в пластинах и слитках кремния.

На сегодняшний день использование СВЧ методов для измерения электрофизических параметров полупроводников получило широкое распространение, ввиду низкой стоимости приборов и возможности быстрого сканирования по площади. Принцип действия этих методов основан на регистрации потерь СВЧ мощности, вносимых свободными носителями исследуемого образца в поле измерительного датчика. При измерении удельного электрического сопротивления величина потерь СВЧ мощности напрямую определяет удельное сопротивление образца. При измерении времени жизни носителей заряда регистрируется изменение потерь СВЧ поля в полупроводнике, освещаемом импульсами оптического излучения.

На сегодняшний день большое распространение, отчасти из-за хорошо продуманной приборной части, отчасти из-за агрессивного маркетинга, получили приборы, использующие рупорную антенну в качестве источника и приемника электромагнитного поля и лазерный светодиод в качестве источника оптических импульсов. При этом получается что электромагнитное поле зондирует всю поверхность материала, а освещаемая светом точка определяет ту часть материала, которая участвует в измерениях. Однако, такой способ измерения является не точным, так как при измерении не учитывается диффузия носителей заряда. Чтобы получить корректные данные нужна сложная обработка результатов измерения, что также влияет на увеличение стоимости приборов.

Избежать погрешности, связанной с диффузией можно освещая значительную часть поверхности кремния и проводя изме-

СВЧ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА

рения в малой локальной области. Тем самым, растекание носителей заряда от измерительной области посредством диффузии компенсируется обратным притоком носителей.

Приборы, построенные по такому принципу, были сконструированы в Сибирском физико-техническом институте. В них в качестве измерительного датчика использовался резонатор квазистатического типа с концевым измерительным отверстием. Такие установки показывали хорошие результаты, но, тем не менее, слабо внедрялись на производство.

Мы использовали вместо квазистатического резонатора автодинный датчик с кольцевым измерительным отверстием. Это позволило минимизировать конструкцию установки и сократить число дополнительного оборудования. Конструкция автодинного датчика на диоде Ганна, обеспечивающего одновременное выполнение функции передатчика и преобразователя полезного сигнала, отраженного от измеряемого образца и системы обеспечивающей взаимодействие СВЧ поля с локальной областью измеряемого образца.

Благодаря достоинствам автодинных датчиков – конструктивной простоте, малогабаритности, общедоступности комплектующих элементов, бесконтактности, измерении и удобству эксплуатации – эти датчики могут найти широкое применение в полностью автоматизированных системах контроля изделий в полупроводниковой электронике, производстве материалов, в том числе кремния «солнечного качества» и других областях.

Методика неразрушающего СВЧ контроля

Принцип локального измерения удельного сопротивления основан на изменении сигнала с датчика при взаимодействии СВЧ поля со свободными носителями в малой области полупроводника. В большинстве известных методов потери, вносимые полупроводниковым образцом, регистрируются как изменения прошедшей через локальную область СВЧ мощности.

В диапазоне СВЧ электрофизические параметры полупроводника выражены комплексной диэлектрической проницаемостью, представленной в простейшей форме

$$\vec{\epsilon} = \epsilon \begin{bmatrix} 1 & i \\ \omega \epsilon \epsilon_0 \rho & \end{bmatrix}$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\omega$  — круговая частота зондирующего поля. Используем понятие безразмерной частоты  $\Omega = \omega \epsilon \epsilon_0 \rho$ , численно рав-

ной отношению тока смещения к току проводимости в безграничной среде с удельным сопротивлением  $\rho$  и диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . В безграничной среде при  $\Omega < 1$  токи проводимости преобладают над токами смещения, и среда характеризуется как проводник. В противном случае ( $\Omega > 1$ ) токи смещения малы и среда подобна диэлектрику.

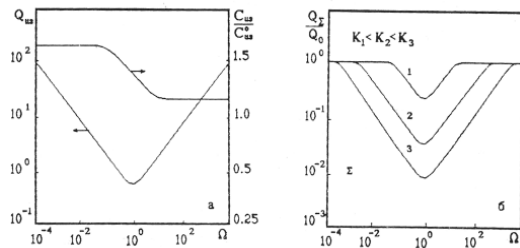


Рисунок 1 - Зависимость: а — добротности и емкости конденсатора, заполненного полупроводником, от безразмерного удельного сопротивления; б — добротности колебательного контура от безразмерного удельного сопротивления для разного коэффициента включения

На Рисунке 1а обращает на себя внимание то обстоятельство, что максимальные потери в электромагнитное поле полупроводник вносит при  $\Omega = 1$ . Поскольку удельное сопротивление кремния солнечного качества 1-3 Ом · см, центральное значение  $\rho = 2$  Ом см, откуда из условия  $\Omega = 1$  следует, что оптимальной частотой зондирующего поля является  $f = 50$  ГГц. В случае емкостного включения образца в поле измерительного датчика, коэффициент включения определяется выражением.

$$K = \frac{C_{из}}{C_{из} + C_0}$$

Величина  $K$  определяется соотношением  $d$  и  $d_0$ , а также соотношением  $C_{из}$ ,  $C_0$  и может меняться: от 0 до 1 (Рисунок 1б). Обращает на себя внимание характерный минимум в области  $\Omega=1$  и стремление  $Q_\Sigma$  к  $Q_0$  при  $\Omega \rightarrow \infty$  и  $Q \rightarrow 0$ . Последний факт очевиден, поскольку в этом случае потери измерительного конденсатора стремятся к нулю и  $Q_\Sigma$  определяется лишь собственными потерями контура. В случае, когда выполняется условие  $\omega \epsilon \epsilon_0 \rho > 1$ , электрическое поле в образце не экранируется свободными носителями, и исследуемый образец можно рассматривать как диэлектрик с потерями, где  $\rho$  - удельное сопротивление полупроводника,  $\omega$  - угловая частота СВЧ поля,  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon$  - относительная ди-

### РАЗДЕЛ III. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

электрическая проницаемость полупроводника. Прошедшая через локальную область СВЧ датчика мощность  $P_{пр}$  записывается

$$P_{пр} = \frac{P_{\infty}}{\left(1 + \frac{\alpha}{\rho}\right)^2},$$

где  $P_{\infty}$  – мощность, прошедшая через датчик в отсутствии образца,  $\alpha$  – коэффициент, определяется экспериментально по калибровочной кривой датчика. Следовательно, имея значение коэффициента  $\alpha$  и измерения  $P_{пр}$  можно определить удельное сопротивление по формуле:

$$\rho = \frac{\alpha}{\left(\left(\frac{P_{\infty}}{P_{пр}}\right)^{\frac{1}{2}} - 1\right)}$$

В случае образцов ( $\omega\epsilon\epsilon_0\rho < 1$ ) СВЧ поле проникает в полупроводник лишь на глубину скин-слоя и потери вносимые удельным сопротивлением образца зависят от толщины скин-слоя и параметров геометрии отверстия. В области удельных сопротивлений (10-1 – 10 Ом·см) не удается получить простые аналитические выражения, связывающие параметры датчика с удельным сопротивлением образца как было показано Детинко М.А.. В этой области с помощью эталонных образцов сопротивлений осуществляется калибровка датчика для измерения удельного сопротивления.

Использование СВЧ метода для определения времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниках известно давно. Процессы релаксации фотоносителей в полупроводниковых материалах, определяемые шириной запрещенной зоны, температурой, концентрацией центров рекомбинации и т.д., зависят также от уровня оптического возбуждения. Длительность оптических импульсов выбрана большей времени жизни ННЗ. Считаем, что возбуждение ННЗ происходит под действием излучения, имеющего высокий коэффициент поглощения, и за время равное длительности импульса, установится стационарное распределение ННЗ. Возбужденные световым импульсом ННЗ, попав в СВЧ поле датчика, приведут к дополнительным потерям СВЧ мощности. Соответствующее этому изменение сигнала на выходе датчика  $P_{вых}$  записывается в виде:

$$P_{вых} = KP_0 \frac{\Delta N}{N_0},$$

где  $P_0$  – СВЧ мощность на входе датчика,  $K$  – коэффициент преобразования изменения проводимости полупроводника в СВЧ выход-

ной сигнал,  $\Delta N$  – полное число ННЗ в СВЧ поле датчика,  $N_0$  – полное число темновых носителей заряда в этой же области.

Проведенный анализ показывает что измерение времени жизни возможно на частотах от несколько гигагерц до десятков гигагерц. Увеличение частоты приводит к уменьшению глубины проникновения и соответственно повышению локальности, но ухудшению чувствительности метода измерения.

#### Оборудование для контроля

Поиск и производство более дешевого и эффективного полупроводникового материала для изготовления солнечных батарей в настоящее время является актуальной задачей. Одним из таких перспективных материалов является мультикремний, производство которого налаживается в Иркутске. Отработка его технологии изготовления требует детального измерения основных электрофизических параметров: удельного сопротивления, времени жизни и типа проводимости. Измерение этих параметров в поликристаллическом материале до сих пор является сложной задачей, так как наличие в кристалле межзеренных границ затрудняет для измерения на постоянном токе применения ранее известных методов, таких как четырехзондовый и его разновидности, Вандер-Пау, эффект Холла и других[4].

Создание современных измерительных приборов предъявляет высокие требования к размерам измерительных датчиков, к чувствительности, к размерам и быстродействию схем выделения сигнала. Одним из путей реализации СВЧ методов для бесконтактного измерения параметров полупроводника – это использование автодинного эффекта. Использование датчиков на основе этого эффекта позволяет минимизировать сам датчик и уменьшить количество функциональных блоков за счет того что непосредственно в самом датчике находится генератор и резонатор. Также следует отметить малое энергопотребление датчика и простоту реализации схемы выделения сигнала, что позволяет создавать миниатюрные измерители удельного сопротивления, где все узлы находятся в едином блоке.

Для реализации поставленной задачи выбран автодинный СВЧ датчик с концевым измерительным отверстием. Это датчик квазистатического типа, где электрическое поле локализовано в области свободного конца СВЧ линии (например коаксиальной, микрополосковой, копланарной и т.д.).

Исследуемые образцы включаются в краевое электрическое поле СВЧ датчика между концом линии и экраном копланарной

## СВЧ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА

линии, изменяя тем самым его сигнал (частоту и потери). Пространственное расширение при измерении вдоль поверхности образца определяется степенью локализации электрического поля вблизи конца линии и, как видно из структуры силовых линий, примерно равно диаметру отверстия. Глубина проникновения электрического поля в образец близка к размеру отверстия [14].

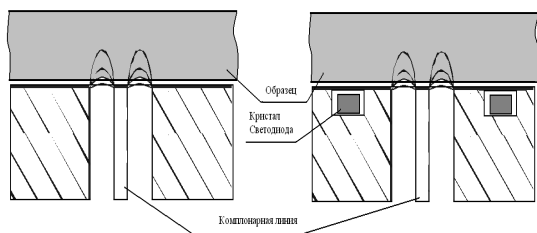


Рисунок 2 - Электрическое поле СВЧ датчика в локальной области копланарной линии.

а) датчик без светодиода, б) датчик со светодиодом

При создании прибора на его основе были оптимизированы все его блоки для повышения уровня сигнала фотопроводимости: канал оптического возбуждения (ток накачки, время нарастания зондирующего импульса), диод Ганна (его частота и мощность), длина волны и мощность излучения светодиодов. Технические характеристики прибора следующие. Диапазон удельного сопротивления от 0,5 до 10 Ом см, диапазон измеряемых значений времени жизни от 100 нсек до 5 мсек.

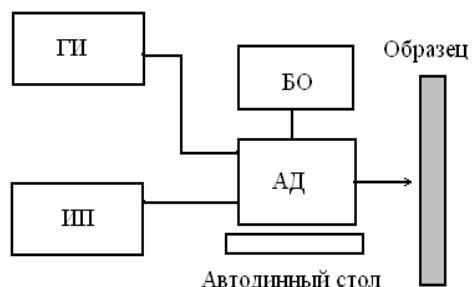


Рисунок 3 - Установка измерения распределения удельного сопротивления и времени жизни по поверхности пластин

Для оценки разрешающей способности была использована установка в которой был применен автодинный датчик М-55314 5-миллиметрового диапазона длин волн ( $f \approx 60$  ГГц) [12]. Установка (Рисунок 4) позволяет осуществлять бесконтактный автоматизированный контроль плоских объектов и получение их плоскостных изображений.

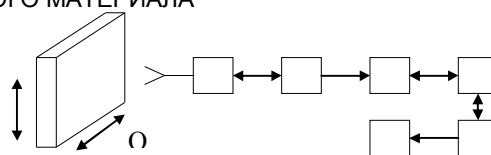


Рисунок 4 - Структурная схема установки: 1 – датчик М-55314 с антенной; 2 – блок выделения сигнала автодетектирования; 3 – блок АЦП; 4 – ЭВМ; 5 – блок управления сканирующим устройством; 6 – сканирующее устройство; ОК – объект контроля

Объект контроля сканируется датчиком 1. Изменения тока в цепи питания датчика, вызванные воздействием отраженного сигнала, регистрируются блоком 2, поступая после оцифровки в блоке АЦП 3.



Рисунок 5 - Модули 5-мм диапазона -(1-3) («Тигель-05»), имеющих размеры 15x15x6мм, вес менее 3,5г (БШ2.000.138ТУ)

Результаты измерений показали принципиальную возможность использования автодинных датчиков М-55314 в системах визуализации дефектов в объектах контроля. На данном этапе установка позволяет обнаружение и локализацию дефектов.

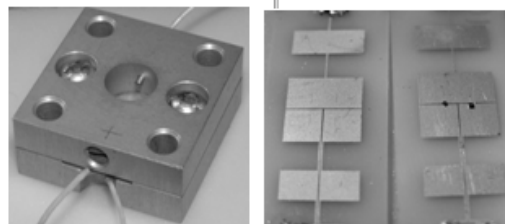


Рисунок 6 - Внешний вид и топология автодинных модулей 8-мм диапазона («Тигель-08» и «Тигель-08ЧМ»), выполненных только с диодом Ганна и с дополнительными элементами – варикапом или детектором

Таблица 1

Параметр	ед. изм.	Тигель-08, 08ЧМ	М55314(Тигель-5)
Частота	Ghz	33.4-36	55-63
Энерг. потенциал	dB	63	63
Выходная мощность	mkW	30-2000	30-600
Диап. перестройки	Ghz	0,6	-
Напряжение питания	V	3-4,5	2.0- 3.5
Рабочий ток, не более	mA	120	60

Темой для дальнейших исследований может стать количественное определение

### РАЗДЕЛ III. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

размеров дефектов, их типа. Предложенная система обеспечивает разрешение по размерам дефектов  $\approx 0,5$  мм и локальность 0,35 мм. Повышение разрешающей способности установки может быть достигнуто оптимизацией конструкции антенны, уменьшением шага сканирования установки, использованием более высокочастотных датчиков.

#### Оценка точности измерений

Автодинный СВЧ датчик (АД) – приемопередающая система, у которой амплитуда, частота, автосмещение изменяются под воздействием излучения, отраженного от объекта исследования и содержащего необходимую информацию о параметрах объекта. В настоящей работе представлены результаты теоретического исследования на основе модели АД на диодах Ганна предложенной Носковым В.Я. [3] с учетом особенностей описанных Усановым Д.А. [2]. Получены основные уравнения для характеристик АД и проведен анализ погрешностей, позволивший определить основные требования к его параметрам, обеспечивающим приемлемую точность измерения кремния солнечного качества.

В качестве модели АД, характеризуемого всеми обобщенными параметрами, используется двухполюсник активного элемента (АЭ) с гистерезисной обратной связью между током АЭ и мгновенным напряжением при автоколебаниях.

Различная крутизна автодинного сигнала при переходе его через нуль от положительных значений к отрицательным и наоборот и разнообразные формы автодинного сигнала ряда частных случаев [2-5], требуют учета этого факта при разработке датчиков параметров полупроводниковых материалов.

Измерение параметров изделий с помощью автодинного СВЧ-датчика при совместной обработке совокупности автодинных сигналов, точность измерений можно значительно повысить используя фазовую чувствительность АД. Этот метод состоит в сравнении параметров «эталонного» образца с параметрами контролируемого, где  $\Delta$  – отклонение параметра от эталонного. Отклонение  $\Delta$  можно регистрировать по автодинным изменениям частоты (6), амплитуды (4), автосмещения (3) или мощности (5). Наиболее простая реализация устройства получается при регистрации автодинного сигнала в цепи питания генератора по изменению среднего значения тока АЭ или напряжения на нем.

СВЧ сигнал от автодина, излучается через антенну в сторону контролируемого образца КО. Отраженное от него излучение через упомянутые элементы волноводного

тракта воздействует на автодин, вызывая автодинные изменения амплитуды и частоты автоколебаний, а также режима работы АЭ. На схему регистрации СР поступает сигнал автодина и смещения АЭ от источника питания ИП. Выходной сигнал от схемы регистрации подается на индикаторное устройство ИУ, отградуированное перед проведением измерений по «эталонному» образцу.

С учетом особенности формирования дискриминационной характеристики автодинного датчика и на основе анализа [12] оценим среднюю квадратичную погрешность  $\sigma_i$  измерения отклонений параметров контролируемых образцов от номинального значения параметров «эталонного» образца. Принимая во внимание статистическую независимость основных составляющих погрешности, получаем:

$$\sigma_i = (\lambda / 4\pi) \sqrt{\gamma_u^2 + \gamma_r^2 + \gamma_k^2 + \gamma_\omega^2}, \gamma_\ell = \sigma_\ell / \lambda,$$

где  $\gamma_u$  – относительный уровень шума на выходе автодина;  $\gamma_{\tilde{A}} = \delta\tilde{A} / \tilde{A}$  – относительное изменение уровня отраженного излучения в зависимости от качества обработки поверхности изделия;  $\gamma_{\hat{E}_0} = \delta\hat{E}_0 / \hat{E}_0$  – относительная нестабильность коэффициента автодетектирования автодинного генератора;  $\gamma_\omega = \delta\omega / \omega_0$  – относительная нестабильность частоты колебаний автодина;  $\gamma_i$  – погрешность автодинного метода относительно длины волны излучения.

Из (6) следует, что с уменьшением длины волны  $\lambda$  излучения погрешность измерения  $\sigma_i$  также уменьшается. Выражения (6) позволяют сформулировать основные требования к узлам автодинного измерителя при его проектировании. Для уменьшения погрешности  $\gamma_\omega$  следует использовать АД на основе малощумящих диодов Ганна, а также расширять динамический диапазон устройства, особенно в части его низкочастотных каскадов усиления; при этом необходимо максимально избавляться от паразитных сигналов и различного рода помех. Погрешность  $\gamma_r$  зависит от отношения уровня неоднородности поверхности к длине волны излучения. Если этой погрешностью пренебречь невозможно, то для введения коррекции в результате измерения целесообразно применять индикатор уровня отраженного излучения, который одновременно даст дополнительную информацию о качестве обработки поверхности изделий. Погрешность  $\gamma_k$  оптимизируется правильным выбором режима автодинного генератора, обеспечивающего его устойчи-

## СВЧ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАТЕРИАЛА

вость в широком диапазоне внешних воздействий.

В макете автодинного датчика (рис 3.6), использовали модуль 5-миллиметрового диапазона М-55314, максимальный уход частоты, в диапазоне температур  $\pm 50^{\circ}\text{C}$  составил 12 МГц, т.е.  $\gamma_i = 2,7 \cdot 10^{-4}$ . При напряжении питания диода Ганна  $U_0$  и его изменении  $\pm 0,1$  В и указанном диапазоне температур относительно вариации коэффициента автодетектирования получены порядка  $2,2 \cdot 10^{-3}$ . Схема регистрации СР обеспечила преобразование автодинных изменений тока диода Ганна в напряжение полезного сигнала при  $U_0 = \text{const}$ . Затухание 10 дБ аттенюатора позволило при уровнях выходного шума 30 мВ и полезного сигнала до 13В получить  $\gamma_0 = 2,3 \cdot 10^{-6}$ , а пре-небрежение влиянием  $\gamma_{\lambda}$  получить расчетные значения относительной погрешности  $\gamma_{\lambda} = 2,5 \cdot 10^{-4}$  и средней квадратичной  $\sigma_{\lambda} = 2 \cdot 10^{-3}$ .

Экспериментальная оценка воспроизводимости измерений на эталонных образцах кремния с удельным сопротивлением 10 Ом см показала отклонения от среднего значения менее 0,3 Ом см. Под эталонным образцом подразумевается образец пластины с максимальной однородностью параметров по поверхности пластины отобранный из более чем 1000 пластин кремния.

Таким образом, расчеты и эксперимент показали, что автодинный метод измерения удельного сопротивления может обеспечить погрешность менее 3 %.

Благодаря достоинствам автодинных датчиков – конструктивной простоте, малогабаритности, общедоступности комплектующих элементов, бесконтактности, измерении и удобству эксплуатации – эти датчики могут найти широкое применение в полностью автоматизированных системах контроля изделий в полупроводниковой электронике, производстве материалов, в том числе кремния солнечного качества и других областях [1, 11].

### Выводы

На основе расчетов и экспериментального исследования СВЧ-методик на основе автодинных датчиков СВЧ диапазона для измерения удельного сопротивления и времени жизни в структурно неоднородном кремнии установлена приемлемая точность и локальность достаточные для контроля структурно неоднородных кремниевых пластин.

Разработаны технические решения, позволяющие проводить измерения удельного сопротивления от 0,5 до 10 Ом см и времени жизни от 100 нсек до 5 мсек.

На основе разработанных датчиков ОАО «НИИПП» сконструирован измерительно-вычислительный комплекс для бесконтактного измерения распределения удельного сопротивления по поверхности полупроводниковых пластин, причем размер контролируемых пластин ограничивается лишь областью перемещения обеспечивающим координатным столом.

Моделирование конструкции концевой датчика показывает, что локальность определяется интервалом значений  $d/D$  при заданной чувствительности измерительной схемы и режима работы.

Обоснована возможность использования СВЧ-методов для измерения удельного сопротивления кремния и создан ряд установок с различными типами СВЧ-датчиков, позволяющих измерять распределение удельного сопротивления с разрешением не хуже 1 мм.

Показано, что для кремния в диапазоне удельных сопротивлений от 1 до 10 Ом·см точность измерения не хуже 10%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саврасов В.Ф., Юрченко А.В., Юрченко В.И. Информационно-аналитические аспекты использования солнечной энергии Материалы 1 научно-практической конференции Информационно-измерительная техника и технологии Томск, 25-26 февраля 2010 г. стр.64-70
2. Усанов Д.А., В.Д Тупикин В.Д, Скриапль А.В., Коротин Б.Н. Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ генераторах для создания устройств радиоволнового контроля. Дефектоскопия, 1995, т.31, №5, стр.16-20.
3. Носков В.Я. Анализ автодинного СВЧ датчика для бесконтактного измерения и контроля размеров изделий. Измерительная техника 1992 вып.3 стр.24-26.
4. Непомнящий А.И., Красин Б.А, Токарев А.С, Шамирзаев Т.С. Структура и электрофизические свойства мультикристаллического кремния // Сб. тезисов конф. Кремний 2004 – (Иркутск, 5–9 июля 2004 г.) – Иркутск, 2004. – С.45.
5. Бородавский П.А., Булдыгин А.Ф, Токарев А.С. СВЧ измерения распределения времени жизни по диаметру и длине слитка кремния // Сб. тезисов конф. Кремний 2006 – (Красноярск, 4–6 июля 2006 г.) – Красноярск, 2006. – С.102.
6. Юрченко А.В., Юрченко В.И. Физические основы метрологии полупроводниковых фотоматериалов и тестирование сложных соединений на основе арсенида галлия // Материалы 7 Росс. конф. "Арсенид галлия GaAs-99" 21-23 октября 1999 г., Томск, С.60–61.

### РАЗДЕЛ III. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

7. Ушеренко А.А., Юрченко В.И. Автоматизированная контрольно-измерительная аппаратура для технологического контроля. // Электронная промышленность –1993. – № 9. – С. 50–53.
8. Yurchenko A.V G.E. Lapatin High-express micro-wave frequencies-methods of measuring the distribution of specific resistance and existence of polysilicon Proceedings of 23st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia 1-5 September 2008, pp. 1840-1843
9. Юрченко А.В., Лапатин Л.Г., Новиков А.В. Бесконтактный локальный метод измерения удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда в мультикремнии. Известия ТПУ т.314.№2. в печати.
10. Воторопин С.Д., Юрченко А.В., Юрченко В.И., Чихман А.В., Крылов С.В., Мызгин В.С. Автоматизированная установка на основе автодинных датчиков КВЧ диапазона для контроля материалов // Электронная промышленность. – 1998. – Вып. 1-2. – С.136 – 137.
11. Юрченко А.В., Юрченко В.И., Воторопин С.Д. Автодинные датчики в измерительной технике. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2009. – 128 с.
12. Юрченко А.В., Воторопин С.Д., Юрченко В.И. Установка для визуализации и определения мест расположений дефектов в солнечных элементах на основе автодинных датчиков 5 – миллиметрового диапазона длин волн // VIII-я Крымская Междунар. Микроволновая Конф. “КрыМиКо’98”. Труды конф. – Севастополь. – сентябрь 1998.
13. Бондаренко И.Н., Гордиенко Ю.Е., Ларкин С.Ю. Системы формирования информационных сигналов в резонаторной микроволновой микроскопии // 19-я Междунар. конф. «КрыМиКо-2009»: Сб. докл. (Севастополь, сентябрь 2009 г.) – Севастополь, 2009 – С. 563–564
14. Новиков А.И., Юрченко А.В., Юрченко В.И. Моделирование локальности определения удельного сопротивления кремния. Сб. труд. 2 ой межд. научно - практ. конф. «Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений» г. Томск 23-25 ноября 2010 г. С.250-251.

*А.Н. Новиков, аспирант, ГОУ ВПО НИ ТПУ, e-mail: an-novikov@inbox.ru. А.В. Юрченко, профессор, д.т.н., ГОУ ВПО НИ ТПУ, e-mail: niipp@inbox.ru.*

УДК 531.717.86

## БЕСКОНТАКТНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ С БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

Д.В. Алимов, Д.В. Вахрушев, А.Е. Гольдштейн, Е.В. Якимов

В работе описан новый модернизированный вариант системы контроля соосности сварных соединений бурильных труб с беспроводным соединением с измерительным блоком. Предложена конструкция взаимноиндуктивного преобразователя расстояния до поверхности трубы.

**Ключевые слова:** бурильные трубы, приваренные замки, соосность, система контроля, взаимноиндуктивный преобразователь.

Ведущее место в обширной номенклатуре бурильных труб занимают трубы стальные с приваренными замками. Конструктивно такие трубы состоят из трех элементов: тела трубы и двух замков – муфты и ниппеля, приваренных к телу трубы методом сварки трением. Важной характеристикой сварных соединений бурильных труб, в значительной мере определяющей трудоемкость и точность бурения, срок службы бурового оборудования является соосность приваренных замков и тела трубы.

В соответствии с [1] контроль соосности заключается в измерении при вращении трубы радиальных биений замковой части трубы относительно оси тела бурильной трубы в двух сечениях, первое из которых расположено вблизи сварного соединения, а второе –

вблизи торца замковой части трубы. Параллельное  $a_1$ , мм и угловое  $a_2$ , мм/100мм отклонения от соосности определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{\delta_1}{2}, \quad a_2 = \frac{\delta_2 - \delta_1}{2 \cdot L} \cdot 100 \quad (1)$$

где  $\delta_1$  – биение в сечении 1, мм;  $\delta_2$  – биение в сечении 2, мм;  $L$  – расстояние между сечениями, мм.

В целях автоматизации процесса измерения соосности на кафедре информационно-измерительной техники ТПУ разработана система контроля соосности СКС 10.02 [2]. В производственных условиях система контроля устанавливается на линии изготовления бурильных труб на участках сварки трением, температурного отпуска сварного соедине-