

СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ СВЧ АВТОДИННЫХ ДАТЧИКОВ

А.В. Юрченко, А.Н. Новиков

В работе описан способ измерения удельного электрического сопротивления и рекомбинационного времени жизни носителей заряда в пластинах кремния, используемого для изготовления фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: автодинный датчик, СВЧ-метод, структурно неоднородные материалы.

Темпы развития солнечной энергетики сдерживаются дефицитом и высокими ценами кремния солнечного качества. Создаются несколько предприятий по производству поликремния (г. Железногорск, г. Усолье-Сибирское, г. Томск), а также развиваются существующие предприятия производства кремния (ЦКП «Гиредмет» г. Москва, ЗЧМ г. Красноярск) [1].

Возрождению промышленности кремния в России, ставит перед инженерами серьезные задачи в части организации технологии производства. Диагностика электрофизических параметров кремния является необходимой частью технологии его производства, поэтому требуются приборы контроля кремния солнечного качества.

Полную информацию о качестве кремния можно получить, зная его удельное электрическое сопротивление и время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) [2].

Изначально для измерения этих параметров использовались контактные методы, основанные на протекании тока через образец, однако, ввиду их явных недостатков они уступили свое место более перспективным бесконтактным методам: микроволновым и оптическим.

Оптические установки дороги, и их использование может быть оправдано лишь в случаях, когда требуется слиток кремния более высокого качества и однородности. Приборы, основанные на микроволновых методах, могут использоваться для широкого круга задач, ввиду низкой стоимости и возможности быстрого сканирования по площади.

Принцип действия микроволновых методов основан на регистрации потерь СВЧ мощности, вносимых свободными носителями исследуемого образца в СВЧ поле измерительного датчика.

При измерении удельного электрического сопротивления величина потерь СВЧ мощности напрямую определяет удельное сопротивление образца [3].

При измерении времени жизни ННЗ используется СВЧ метод измерения спада фотопроводимости. Метод основан на регистрации потерь СВЧ поля в локальном участке полупроводника, освещаемого импульсами оптического излучения.

На рисунке 1 представлено сравнение структуры измерительных установок на основе СВЧ резонатора (рисунок 1а) и автодинного датчика (рисунок 1б).

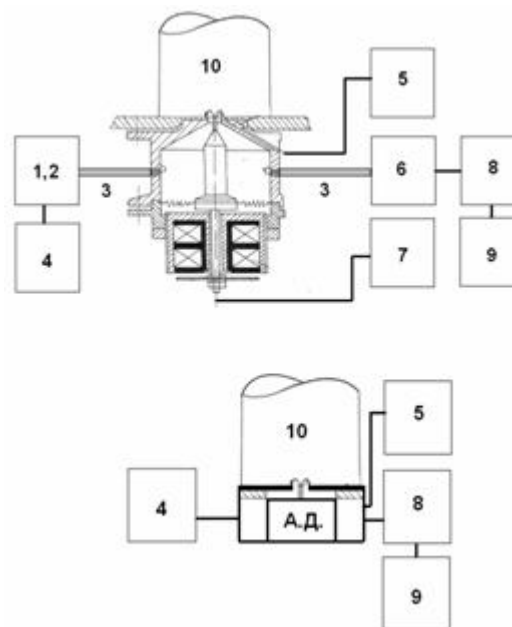


Рисунок 1 - Структура измерительной установки на основе СВЧ резонатора (а), и на основе автодинного датчика (б): 1 – генератор, 2 – резонатор, 3 – волновод, 4 – источник питания, 5 – генератор импульсов, 6 – детектор, 7 – блок управление штырем, 8 – блок обработки, 9 – индикатор (ЭВМ), 10 – образец

РАЗДЕЛ II. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

Как видно из рисунка измерительная установка на автодинном датчике имеет гораздо меньше дополнительного оборудования, что в свою очередь упрощает конструкцию, что в свою очередь снижает цену и габариты установки.

Конструкция автодинного датчика содержит автогенератор на диоде Ганна, обеспечивающий одновременное выполнение функции передатчика и преобразователя полезного сигнала, отраженного от измеряемого образца и системы обеспечивающей взаимодействие СВЧ поля с локальной областью измеряемого образца.

Экспериментальная часть

Проведенный анализ и результаты, полученные авторами [3-5], показывают, что измерение времени жизни возможно на частотах от единиц до десятков гигагерц. Дальнейшее увеличение частоты приводит к уменьшению глубины проникновения и, соответственно, повышению локальности, но ухудшению чувствительности метода измерения.

Для реализации поставленной задачи разработан автодинный СВЧ-датчик с концевым измерительным отверстием. Это датчик квазистатического типа, где электрическое поле локализовано в области свободного конца копланарной линии (рисунок 2).

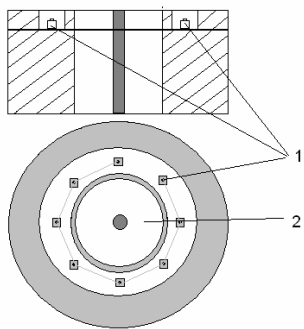


Рисунок 2 - Конструкция автодинного СВЧ датчика в локальной области копланарной линии: 1 – кристаллы светодиода, 2 – кольцевое измерительное отверстие

Для модуляции фотопроводимости в измерительный датчик встроены светодиоды.

Блок обработки представляет собой систему выделения полезного сигнала. Схема блока обработки выполнена на основе маломощного операционного усилителя типа КР544УД1А и составного транзистора. В основу принципа действия этой схемы положено преобразование автодинных изменений тока через диод Ганна в напряжение с помо-

щью операционного усилителя. Благодаря наличию обратной связи обеспечивается практически нулевое входное сопротивление со стороны диода Ганна, что полностью исключает обратную реакцию цепи питания на режим генератора по СВЧ. Напряжение питания диода Ганна определяется величиной опорного напряжения.

Исследуемые образцы включаются в краевое электрическое поле СВЧ-датчика между концом линии и экраном копланарной линии, изменяя тем самым его сигнал (частоту и потери). Пространственное разрешение при измерении вдоль поверхности образца определяется степенью локализации электрического поля вблизи конца линии и исходя из структуры силовых линий, примерно равно диаметру отверстия. Глубина проникновения электрического поля в образец близка к диаметру отверстия.

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 Ом·см до 10 Ом·см, диапазон измеряемых значений времени жизни от 100 нс до 5 мс.

Калибровка установки производилась на образцах с известным удельным сопротивлением (ИФП СО РАН) в диапазоне от 0,2 до 20 Ом·см.

Результаты и их обсуждение

Эксперименты показали, что собранная установка позволяет измерять время жизни ННЗ структурно-неоднородного материала по площади пластин с удельным сопротивлением от 0,5 Ом·см и выше и определять неоднородность времени жизни.

По этой методике сконструирован измерительно-вычислительный комплекс для дефектоскопии структурных неоднородностей по поверхности материалов диаметром до 200 мм.

В разработанной дефектоскопической установке был применен автодинный датчик М-55314 5-миллиметрового диапазона длин волн ($f \approx 60$ ГГц). Установка позволяет осуществлять бесконтактный автоматизированный контроль плоских объектов и получение распределения отраженного сигнала по поверхности.

СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНОГО КРЕМНИЯ НА ОСНОВЕ СВЧ АВТОДИННЫХ ДАТЧИКОВ

Были получены изображения структур, моделирующих дефекты в различных объектах. Результат сканирования пластины, на поверхности которой были вытравлены 4 полоски меди шириной 3, 2, 1 и 0.5 мм, представлен на рисунке 3.

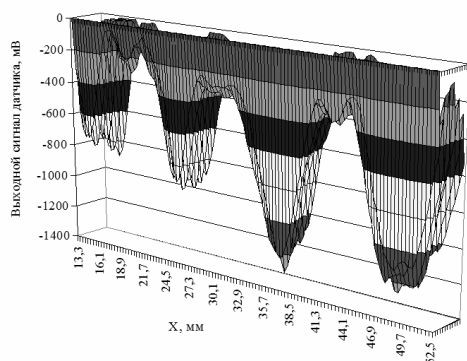


Рисунок 3 - Распределение отраженного от поверхности сигнала

Результаты измерений показали принципиальную возможность использования автодинных датчиков М-55314 в системах визуализации поверхностных структурных дефектов в объектах контроля. Для дальнейших исследований необходимо количественное определение размеров дефектов, их типа. Предложенная система обеспечивает разрешение по размерам дефектов ≈ 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.

Для анализа возможности выявления структурных дефектов по глубине пластин были исследованы многослойные структуры арсенида галлия и фосфида индия, имеющие высокоомный слой под проводящими слоями. Анализ взаимосвязи между величиной СВЧ-сигнала на выходе датчика со слоистой структурой показывает, что величина СВЧ-сигнала растет с уменьшением удельного сопротивления скрытого слоя вследствие меньшей величины вносимых потерь. Причем для выделения вклада, вносимого подложкой, был проведен эксперимент по измерению СВЧ-сигнала 6 подложек, на которых затем были выращены эпитаксиальные слои с различной концентрацией и измерен СВЧ-сигнал. Получено, что с ростом концентрации величина вносимых потерь уменьшается. Проведенные исследования показывают возможность измерения удельного сопротивления скрытых слоев в многослойных пленках

фосфида индия СВЧ-методом, причем общие закономерности имеют тот же характер, что и для пленок арсенида галлия.

Таким образом, показано, что предложенные методы и разработанные установки позволяют измерять материалы (в том числе мультикремний), имеющие структурную неоднородность как по поверхности, так и по глубине.

Проведена оценка точности предложенного метода на основе модели автодинного датчика на диодах Ганна предложенной Воторопиным С.Д. и Носковым В.Я. [6,8] с учетом особенностей описанных Усановым Д.А. [7].

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

Измерение параметров кремния с помощью автодинного СВЧ-датчика при совместной обработке совокупности автодинных сигналов можем значительно повысить точность измерений используя фазовую чувствительность автодинного датчика. Этот метод состоит в сравнении параметров «эталонного» образца с параметрами контролируемого. Отклонение можно регистрировать по автодинным изменениям частоты, амплитуды, автосмещения или мощности. Наиболее простая реализация устройства получается при регистрации автодинного сигнала в цепи питания генератора по изменению среднего значения тока АЭ или напряжения на нем.

Спроектировано устройство для оценки точности измерений рис 4.

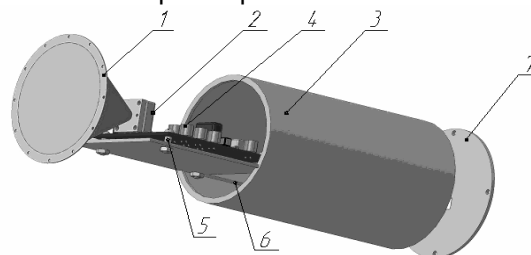


Рисунок 4 – Конструкции автодинного датчика 1 – рупорная антенна; 2 – модуль автодина; 3 – корпус; 4 – печатный узел; 5 – втулка дистанцирующая; 6 – фиксатор; 7 – крышка

СВЧ сигнал от автодина, излучается через антенну в сторону контролируемого образца. 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 схе-

РАЗДЕЛ II. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

му регистрации поступает сигнал автодина и смещения АЭ от источника питания. Выходной сигнал от схемы регистрации подается на индикаторное устройство, отградуированное перед проведением измерений по «эталонному» образцу.

На основе анализа [8] оценим среднюю квадратичную погрешность σ_i измерения отклонений параметров контролируемых образцов от номинального значения параметров «эталонного» образца. Принимая во внимание статистическую независимость основных составляющих погрешности, получаем:

$$\sigma_i = (\lambda / 4\pi) \sqrt{\gamma_{ш}^2 + \gamma_{Г}^2 + \gamma_{К}^2 + \gamma_{\omega}^2}, \gamma_{\ell} = \sigma_{\ell} / \lambda$$

где γ_{ω} - относительный уровень шума на выходе автодина; $\gamma_{Г} = \delta G / G$ - относительное изменение уровня отраженного излучения в зависимости от качества обработки поверхности изделия; $\gamma_{К} = \delta K_0 / K_0$ - относительная нестабильность коэффициента автодетектирования автодинного генератора; $\gamma_{\omega} = \delta \omega / \omega_0$ - относительная нестабильность частоты колебаний автодина; γ_i - погрешность автодинного метода относительно длины волны излучения.

Формула позволяет определить основные требования к узлам автодинного измерителя при его проектировании. Для уменьшения погрешности $\gamma_{ш}$ следует использовать АД на основе малошумящих 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 $\gamma_{Г}$ зависит от отношения уровня неоднородности поверхности к длине волны излучения. Если этой погрешностью пренебречь невозможно, то для введения коррекции в результат измерения целесообразно применять индикатор уровня отраженного излучения, который одновременно даст дополнительную информацию о качестве обработки поверхности изделий. Погрешность $\gamma_{К}$ оптимизируется правильным выбором режима автодинного генератора, обеспечивающего его устойчивость в широком диапазоне внешних воздействий.

В макете автодинного датчика (рис 4), 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 $U_0 = 4 \text{ В}$ и его изменении $\pm 0,1 \text{ В}$ и указанном диапазоне температур относительно вариации коэффициента автодетектирования получены порядка $2,2 \cdot 10^{-3}$. Схема регистрации 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 $\gamma_{ш} = 2,3 \cdot 10^{-6}$, а пренебрежение влиянием $\gamma_{Г}$ получить расчетные значения относительной погрешности $\gamma_{\ell} = 2,5 \cdot 10^{-4}$ и средней квадратичной - $\sigma_{\ell} = 2 \cdot 10^{-3}$.

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 порядка 3 %.

Благодаря достоинствам рассматриваемых 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.

Выводы

Проведено обоснование применимости СВЧ-метода измерения удельного сопротивления и времени жизни в структурно неоднородном кремнии и разработаны технические решения, позволяющие проводить их измерения

На основе разработанных датчиков в ОАО «Научно-исследовательский институт

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ НА КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЯХ

полупроводниковых приборов» (г.Томск) сконструирован измерительно - вычислительный комплекс для бесконтактного измерения распределения удельного сопротивления по поверхности полупроводниковых пластин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрченко, А.В. Реальная стоимость энергии – от ресурсов до потребителя// А.В. Юрченко, Ф.В. Саврасов, В.И. Юрченко. - Известия ТПУ, 2009. – Т. 314, № 3. – С. 43–46
2. Непомнящий, А.И. Структура и электрофизические свойства мультикристаллического кремния // А.И. Непомнящий, Б.А. Красин, А.С. Токарев, Т.С. Шамирзаев. - Сб. тез. конф. «Кремний 2004» – Иркутск, 2004. – С.45
3. Воторопин, С.Д. Автоматизированная установка на основе автодинных датчиков КВЧ диапазона для контроля материалов.//С.Д. Воторопин, А.В. Юрченко, В.И. Юрченко, А.В. Чихман, С.В. Крылов, В.С. Мызгин. - Электронная промышленность.1998. вып. 1-2. С.136-138.
4. Крылов, С. В. Установка визуализации и определения мест дефектов в плоских материалах на основе КВЧ автодинных датчиков 5-и мм диапазона.// С. В. Крылов, А. В. Юрченко, С. Д. Воторопин, В. И. Юрченко.- Сб. докл. III-я Всеросс. научн.-техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин». - Н. Новгород, 1998, Т.V. С. 4-5.
5. Юрченко, А.В. Установка для визуализации и определения мест расположения дефектов в солнечных элементах на основе автодинных датчиков 5 – миллиметрового диапазона длин волн// А.В. Юрченко, С.Д. Воторопин, В.И. Юрченко. - Труды VIII-ой Крымской Междунар. микроволн. конф. «КрыМиКо'98». – Севастополь, 1998.
6. Воторопин, С.Д. Автодинные СВЧ-датчики для бесконтактных измерений и контроля.// С.Д. Воторопин, В.Я. Носков и др. - Матер. III-ей Крымской конф. «СВЧ-техника и спутниковые телекоммуникационные технологии». - Севастополь. -1992. -С.159-164.
7. Усанов, Д.А. Использование эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ генераторах для создания устройств радиоволнового контроля.// Д.А. Усанов, В.Д. Тупикин, А.В. Скриапль, Б.Н. Коротин Дефектоскопии. -1995. -Т.31. -№5. -С.16-20.
8. Носков, В.Я. Анализ автодинного СВЧ датчика для бесконтактного измерения и контроля размеров изделий. // В.Я. Носков. - Измерительная техника. -1992. -вып.3. -С.24-26.

К.т.н., доцент Юрченко А.В., тел. 8-913-82 60-301, e-mail: piirp@inbox.ru; аспирант Новиков А.Н., Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кафедра информационно-измерительной техники (г. Томск).

УДК: 621.31:658.386

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ НА КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЯХ

А.Г. Якунин А.Г., И.М. Жихарев, А.Л. Ненашев А.Л.

Обсуждаются особенности обработки сигнала, обусловленные характером наблюдаемых сцен изображений систем технического зрения, предназначенных для подсчета и идентификации в производственных условиях объектов, перемещающихся на конвейерных линиях. Описывается один из возможных подходов к разработке алгоритмического обеспечения таких систем.

Ключевые слова: система технического зрения, компьютерное моделирование, оперативный контроль, идентификация изделий, псевдрегулярные структуры, нелинейные алгоритмы.

На сегодняшний день системы технического зрения показали свою высокую эффективность при решении многих задач, связанных с управлением сложными производствами и автоматизацией производственных процессов [1].

Несмотря на достигнутые успехи в области построения таких систем [2], проблема автоматизированного контроля выпускаемой продукции с применением таких преобразователей по-прежнему остается важной и актуальной. Это обусловлено, в первую оче-

редь, тем обстоятельством, что как сами объекты контроля, так и сцена изображения, на которой они находятся, отличаются значительным многообразием.

В целом в общей задаче контроля изделий можно выделить такие частные цели, как их подсчет, идентификацию и комплексную оценку качества. В силу наличия вышеуказанной проблемы приходится констатировать, что в общем виде задача оценка качества до настоящего времени полностью не решена и при контроле с применением теле-