

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

Универсальный цифровой зондовый электромметр для контроля полупроводниковых пластин

А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, К.В. Пантелеев

Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 23.08.2023

Принята к печати 26.09.2023

Для исследования и контроля полупроводниковых пластин широко используются бесконтактные электрические методы, основанные на измерении потенциала поверхности (CPD) в сочетании с освещением и/или осаждением зарядов на образец с помощью коронного разряда, а также на измерении поверхностной фото-ЭДС (SPV). По фото-ЭДС возможно определение времени жизни неосновных носителей заряда, их диффузионную длину и обнаружение следов тяжелых металлов на поверхности. Кроме того, с использованием фото-ЭДС возможно определение поверхностного сопротивления полупроводниковой пластины, некоторые параметры слоя диэлектрика на поверхности и барьерную фото-ЭДС (JPV). Результаты измерения электрических параметров отражают влияние приповерхностных характеристик на конечные характеристики устройств. Целью работы являлась разработка универсального цифрового зондового электромметра, реализующего различные бесконтактные электрические методы анализа полупроводниковых пластин, в котором передача полученных данных, изменение конфигурации, удалённое тестирование и калибровка осуществляются по цифровым каналам локального управления. В работе описан разработанный авторами универсальный цифровой зондовый электромметр, реализующий описанные выше бесконтактные электрические методы анализа полупроводниковых пластин (CPD, SPV и JPV). Управление электромметром, включающее передачу полученных данных, изменение конфигурации, удалённое тестирование и калибровка, осуществляется по цифровым каналам локального управления. Благодаря высокому быстродействию методы определения электрических характеристик подходят для контроля полупроводниковых пластин в процессе производства. Приведены результаты тестирования разработанного зондового электромметра в режимах CPD, SPV и JPV, отражающие эффективность предложенных подходов.

Ключевые слова: цифровой зондовый электромметр, контактная разность потенциалов, полупроводниковая пластина, зонд Кельвина, фото ЭДС, CPD, SPV, JPV

Адрес для переписки:

Жарин А.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Address for correspondence:

Zharin A.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Для цитирования:

А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, К.В. Пантелеев.
Универсальный цифровой зондовый электромметр для контроля
полупроводниковых пластин.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

For citation:

A.L. Zharin, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, K.U. Pansialeyeu
[Universal Digital Probe Electrometer for Testing
Semiconductor Wafers].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 3, pp. 161–172 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

Universal Digital Probe Electrometer for Testing Semiconductor Wafers

A.L. Zharin, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, K.U. Pantsialeueu

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 23.08.2023

Accepted for publication 26.09.2023

Abstract

Non-contact electrical methods are widely used for research and control of semiconductor wafers. The methods are usually based on surface potential measurement (CPD) in combination with illumination and/or deposition of charges on the sample using a corona discharge, and are also based on the measurement of surface photo-emf. By photo-EMF (SPV) it is possible to determine the lifetime of minor charge carriers, their diffusion length and detect traces of heavy metals on the surface. In addition, using photo-EMF it is possible to determine the surface resistance of the plate, some parameters of the dielectric layer on the surface and barrier photo-EMF (JPV). Electrical performance results reflect the influence of near-surface characteristics on the final performance of devices. The aim of the work was to develop a universal digital probe electrometer that implements various non-contact electrical methods for analyzing semiconductor wafers, in which the change in operating modes and configuration, transmission of the received data, remote testing and calibration are carried out via digital local control channels. This paper describes a universal digital probe electrometer developed by the authors, which implements the above-described non-contact electrical methods for analyzing semiconductor wafers (CPD, SPV and JPV), in which the change in operating modes and configuration, transmission of the received data, remote testing and calibration are carried out via digital local control channels. Due to their high speed, electrical characterization methods are suitable for inspecting semiconductor wafers during production. The results of testing the developed probe electrometer in CPD, SPV and JPV modes are presented, which reflect the effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: digital probe electrometer, contact potential difference, semiconductor wafer, Kelvin probe, photo EMF, CPD, SPV, JPV

Адрес для переписки:

Жарин А.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Address for correspondence:

Zharin A.L.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com

Для цитирования:

А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, К.В. Пантелеев.
Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля
полупроводниковых пластин.
Приборы и методы измерений.
2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

For citation:

A.L. Zharin, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, K.U. Pantsialeueu
[Universal Digital Probe Electrometer for Testing
Semiconductor Wafers].
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 3, pp. 161–172 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

Введение

В микроэлектронике важной проблемой является поддержание требуемого качества поверхности полупроводниковых пластин на всех этапах технологического процесса. По мере перехода полупроводникового производства к все более тонким слоям свойства поверхности и приповерхностной области будут оказывать все большее влияние на характеристики изготовленных электронных устройств. Загрязнение поверхности или повреждение в результате обработки пластины могут увеличить скорость рекомбинации носителей заряда на поверхности и снижать их подвижность, что приводит к ухудшению характеристик конечных изделий. Чтобы получить приемлемый выход продукции, необходимо контролировать характеристики поверхности пластины на различных этапах производства. Методы оценки состояния поверхности и эффективности различных видов её обработки необходимы как при отработке технологических процессов, так и для технологического контроля в процессе производства.

Для оценки свойств поверхности полупроводников используются различные методы спектроскопии, включающие химический и физический анализ, а также оптические и электрические методы.

Результаты электрических характеристик, возможно, являются наиболее полезными, поскольку они лучше всего отражают влияние

приповерхностных характеристик на конечные характеристики устройства [1]. Кроме того, благодаря высокому быстродействию методы определения электрических характеристик подходят для контроля полупроводниковых пластин в процессе производства.

Бесконтактные электрические методы обычно основаны на измерении потенциала поверхности (CPD) в сочетании с освещением и/или осаждением зарядов на образец с помощью коронного разряда, а также на измерении поверхностной фото-ЭДС. По фото-ЭДС возможно определение времени жизни неосновных носителей заряда, их диффузионной длины (SPV) и следов тяжёлых металлов на поверхности. Кроме того, с использованием фото-ЭДС возможно определение поверхностного сопротивления пластины, некоторых параметров слоя диэлектрика на поверхности и барьерной фото-ЭДС (JPV) [2–8].

Бесконтактный характер этих методов измерения особенно привлекателен, т.к. делает большинство из них неразрушающими, неинвазивными и позволяет проводить диагностику на различных этапах обработки пластин, а не ждать окончательной характеристики устройства. Электрические методы предлагают возможности полноразмерного картирования пластин с высоким разрешением.

На рисунке 1 схематично представлены бесконтактные электрические методы, применяемые для анализа полупроводниковых пластин.

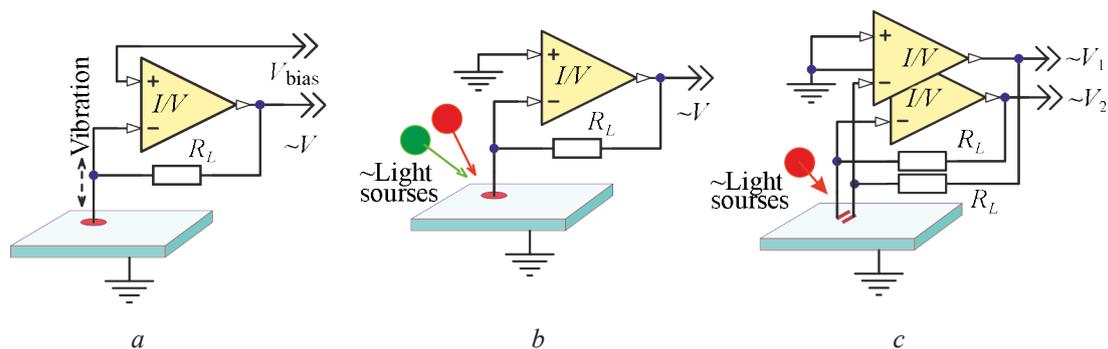


Рисунок 1 – Схематичное представление бесконтактных электрических методов, применяемых для анализа полупроводниковых пластин: *a* – метод Кельвина–Зисмана (CPD); *b* – метод фото-ЭДС с освещением на двух длинах волн (CPV); *c* – метод фото-ЭДС с двумя датчиками на разных расстояниях от светового пятна (JPV)

Figure 1 – Schematic representation of non-contact electrical methods used to analyze semiconductor wafers: *a* – Kelvin–Zisman method (CPD); *b* – photo-EMF method with illumination at two wavelengths (CPV); *c* – photo-EMF method with two sensors at different distances from the light spot (JPV)

В методе Кельвина–Зисмана (рисунок 1а) используется динамический конденсатор, образованный полупроводниковой пластиной и вибрирующим эталонным образцом. В следствии разности потенциалов между пластинами динамического конденсатора, на выходе предусилителя возникает переменный сигнал с частотой вибрации. На конденсатор также подаётся напряжение компенсации (V_{bias}), при равенстве которого разности потенциалов на пластинах конденсатора амплитуда переменного сигнала становится равной нулю. Обычно в традиционных измерителях Кельвина–Зисмана осуществляется автоматическая фазовая автокомпенсация измеряемой величины с помощью фазового детектора и интегратора [9].

Следует отметить, что в методах Кельвина–Зисмана измеряемой величиной является контактная разность потенциалов (КРП) [9]. Под КРП здесь понимается физический параметр, введенный для описания эффекта А. Вольта (электричество Вольта), т. е. возникновение разности потенциалов в зазоре между двумя разнородными металлами. КРП связана с такими фундаментальными параметрами твёрдых тел, как работа выхода электрона и уровень Ферми, т. е. имеют глубокий физический смысл и широко используются в физике полупроводников.

В традиционных измерителях фото-ЭДС (рисунок 1б и 1с) полупроводник освещается синусоидально модулированным светом через полупрозрачную металлизированную пластину, подключённую к зарядочувствительному предусилителю. На выходе предусилителя возникает переменный сигнал с частотой модуляции.

Для получения требуемых физических параметров полупроводников, например, таких как время жизни неосновных носителей заряда, электросопротивление поверхностного слоя, барьерная фото-ЭДС и др., используется освещение с двумя различными длинами волн или регистрация фото-ЭДС от двух зондов, находящихся на различном расстоянии от светового пятна. Используется синусоидальное модулирование света на разных частотах. При этом выделение сигналов на каждой из частот или от каждого зонда осуществляется усилителями с синхронным детектированием

и последующим интегрированием. Сигналы поступают на аналого-цифровые преобразователи и через соответствующие устройства сопряжения на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Таким образом, традиционные измерители представляют собой достаточно громоздкие устройства, требующие относительно большое время интегрирования сигналов для повышения точности, а также требующие прецизионного сопряжения усилительных каналов. Вопрос взаимовлияния на фото-ЭДС от источников с различными длинами волн света обычно не поднимается. При использовании таких устройств для картирования распределения измеряемых параметров по полупроводниковой пластине требуется довольно большое время и, поэтому, как правило, карты распределения имеют относительно низкое разрешение.

Целью работы являлась разработка универсального цифрового зондового электрометра, реализующего различные бесконтактные электрические методы анализа полупроводниковых пластин, в котором передача полученных данных, изменение конфигурации, удалённое тестирование и калибровка осуществляются по цифровым каналам локального управления.

Разработка универсального цифрового зондового электрометра

На рисунке 2 схематично представлен чувствительный элемент разработанного универсального цифрового зондового электрометра. Он выполнен в виде позолоченной печатной платы с гибким шлейфом. Центральный зонд 1 с отверстием (0,5 мм) для оптоволокну является основным для режимов регистрации CPD и SPV. Дополнительные зонды 2 и 3 расположены на одинаковом расстоянии от центрального и работают в режиме JPV. Все зонды окружены «планом плавающей земли» (V_{bias}) [10]. На обратной стороне платы расположена микросхема с четырьмя операционными усилителями с фемтоамперными входными токами и резисторы обратной связи (5 ГОм). Кроме того, там же находятся элементы крепления оптоволокну и пьезовибратора, а также элементы экранирования от внешних наводок. В режиме КРП плата зонда вибрирует под действием пьезовибратора,

а в режимах фото-ЭДС она не подвижна, а возбуждение осуществляется модулированным светом через оптоволоконно.

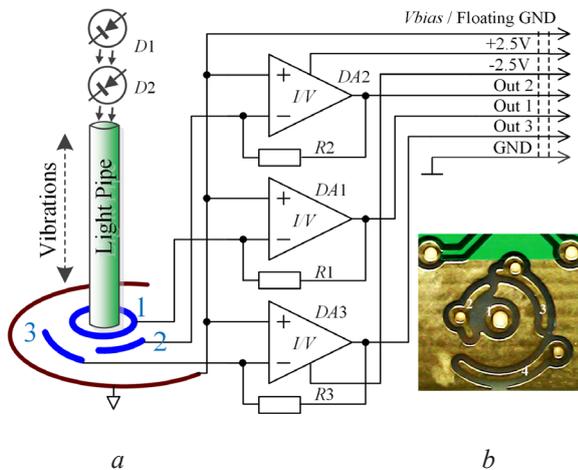


Рисунок 2 – Схематичное представление чувствительного элемента универсального цифрового зондового электрметра (а) и фотография зонда (b)

Figure 2 – Schematic representation of the sensing element of a universal digital probe electrometer (a) and a photograph of the probe (b)

Общим для всех режимов работы является необходимость генерации синусоидального возбуждающего воздействия с последующим анализом амплитудно-фазовых характеристик сигнала отклика на возбуждающее воздействие.

Ранее нами был разработан общий подход к построению интеллектуальных сенсоров для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик на базе современных микроконтроллеров [11], в котором используются связки периферийных устройств микроконтроллера в фоновом режиме без участия процессора (CPU). При этом контроллеры прямого доступа к памяти (DMA) обеспечивают высокоскоростное перемещение данных между периферией и/или памятью без участия CPU. Такой подход использован в настоящей работе.

В микроконтроллере при инициализации запускается основной процесс генерации синусоидального возбуждения и обработки сигнала отклика без участия CPU. Это процесс работает непрерывно и осуществляет общую синхронизацию устройства по соответствующим прерываниям и флагам. Традиционно

в микроконтроллерах для синхронизации используются системные таймеры или операционные системы. В нашем случае для этих целей использован основной процесс генерации синуса, что исключает его сбои. В свою очередь, CPU на максимальной скорости обрабатывает флаги, полученные от основного процесса и прерываний, производит обработку подготовленных DMA данных, осуществляет передачу полученных результатов и служебной информации во внешние устройства, а также обрабатывает прерывания от внешних устройств, принимает команды и параметры конфигурации.

В нашем случае генерирование периода синуса непрерывно осуществляется с использованием предзагруженной таблицы одного периода синуса ($N_{\sin} = 128$ точек). Параллельно с этим осуществляется оцифровка откликов с помощью АЦП, который также отслеживает выход сигнала за установленные пределы с помощью аналогового следящего триггера AWG. В соответствии с предустановленным числом периодов ($N_{\text{periods}} = 4$ и более) накопление данных осуществляется в буфере размером ($N_{\sin} \times N_{\text{periods}}$). При заполнении буфера генерируется прерывание и выставляется соответствующий флаг готовности данных. Далее вышеописанный процесс непрерывно повторяется.

При получении флага готовности данных CPU вносит необходимые изменения в параметры возбуждающего воздействия и усилительного тракта в зависимости от режима работы устройства, а также осуществляет обработку полученных данных. Это происходит параллельно со следующим циклом генерации синуса. Обработка полученных массивов данных осуществляется с использованием 32/64-го арифметического сопроцессора микроконтроллера с помощью встроенных средств цифровой обработки сигналов (DSP). Она включает нормирование массивов, фильтрацию и вычисление амплитудно-фазовых параметров. Кроме того, из массивов данных выделяется однобайтовый 128-разрядный массив (Score) для визуализации сигналов на экране системы управления.

Для получения конечного результата требуется несколько описанных выше циклов, в зависимости от номера цикла (Cycle_No)

изменяется алгоритм обработки. При Cycle_No равном нулю обработка не осуществляется. После выполнения каждого цикла кроме нулевого Cycle_No инкрементируется. При записи в Cycle_No единицы начинается процесс получения и обработки данных в соответствии с выбранным режимом и номером цикла, по окончании которого Cycle_No обнуляется. Система может работать в двух режимах запуска: непрерывном, когда после получения конечного результата CPU осуществляет запуск (установка Cycle_No = 1) самостоятельно, и ждущем, когда запуск осуществляется от внешнего устройства, что необходимо при работе в составе сканирующих систем.

На рисунке 3 показан базовый алгоритм работы CPU при ожидании и получении флага готовности данных. При отсутствии флага происходит выход из подпрограммы. Если флаг активен, происходит переход к обработке данных в соответствии с установленным режимом работы.

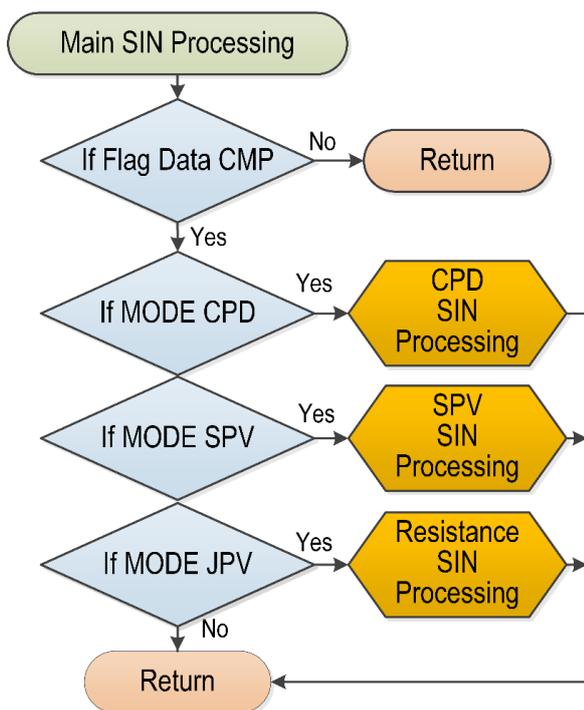


Рисунок 3 – Базовый алгоритм работы CPU при получении и обработке флага готовности данных (Data CMP)

Figure 3 – The basic algorithm of the CPU when receiving and processing the data ready flag (Data CMP)

Рассмотрим алгоритмы работы CPU при различных режимах работы устройства.

Режим измерения контактной разности потенциалов (MODE CPD)

Ранее нами был разработан цифровой измеритель КРП, не требующий фазовой автокомпенсации, используемой в традиционном зонде Кельвина, в котором определяется амплитуда переменных сигналов при двух произвольных напряжениях Bias Up и Bias Down, приложенных к динамическому конденсатору, откуда вычисляется КРП и величина, пропорциональная расстоянию между зондом и пластиной [12]. Отсутствие компенсации не позволяет называть такой измеритель КРП зондом Кельвина.

В режиме CPD возбуждающим воздействием является вибрация одной из пластин динамического конденсатора с помощью пьезопластины.

На рисунке 4 приведён алгоритм обработки данных в режиме CPD. Измерение и обработка в этом режиме производится за семь циклов. Реальная обработка данных происходит только в 3 и 7 циклах, причём в 3 цикле данные получаются при низком напряжении (Bias_Down) на динамическом конденсаторе, а в 7 – при высоком (Bias_Up). Переключение напряжений осуществляется также в 3 и 7 циклах. Разница между Bias_Down и Bias_Up составляет несколько вольт, поэтому при переключениях возникают большие переходные процессы в усилительном тракте. В первую очередь для устранения их влияния были введены пустые циклы 1, 2 и 4, 5, 6. Кроме того, пустые циклы также используются для разнесения по времени процессов передачи данных на внешние устройства, так в циклах 1 и 4 устанавливается Flag_ScoreRQ, инициирующий передачи осциллографических массивов Score. По окончании цикла 7, в котором производятся окончательные расчёты и заполняется буфер конечных данных, устанавливается флаг DATA_Ready, что инициирует передачу буфера конечных данных на внешние устройства. Описанное выше обеспечивает надёжную передачу данных.

Перед выполнением рабочих циклов осуществляется сброс AWG, а после их выполнения AWG анализируется на предмет ошибок, связанных с превышением сигналом допустимых значений. Результат также заносится в буфер конечных данных.

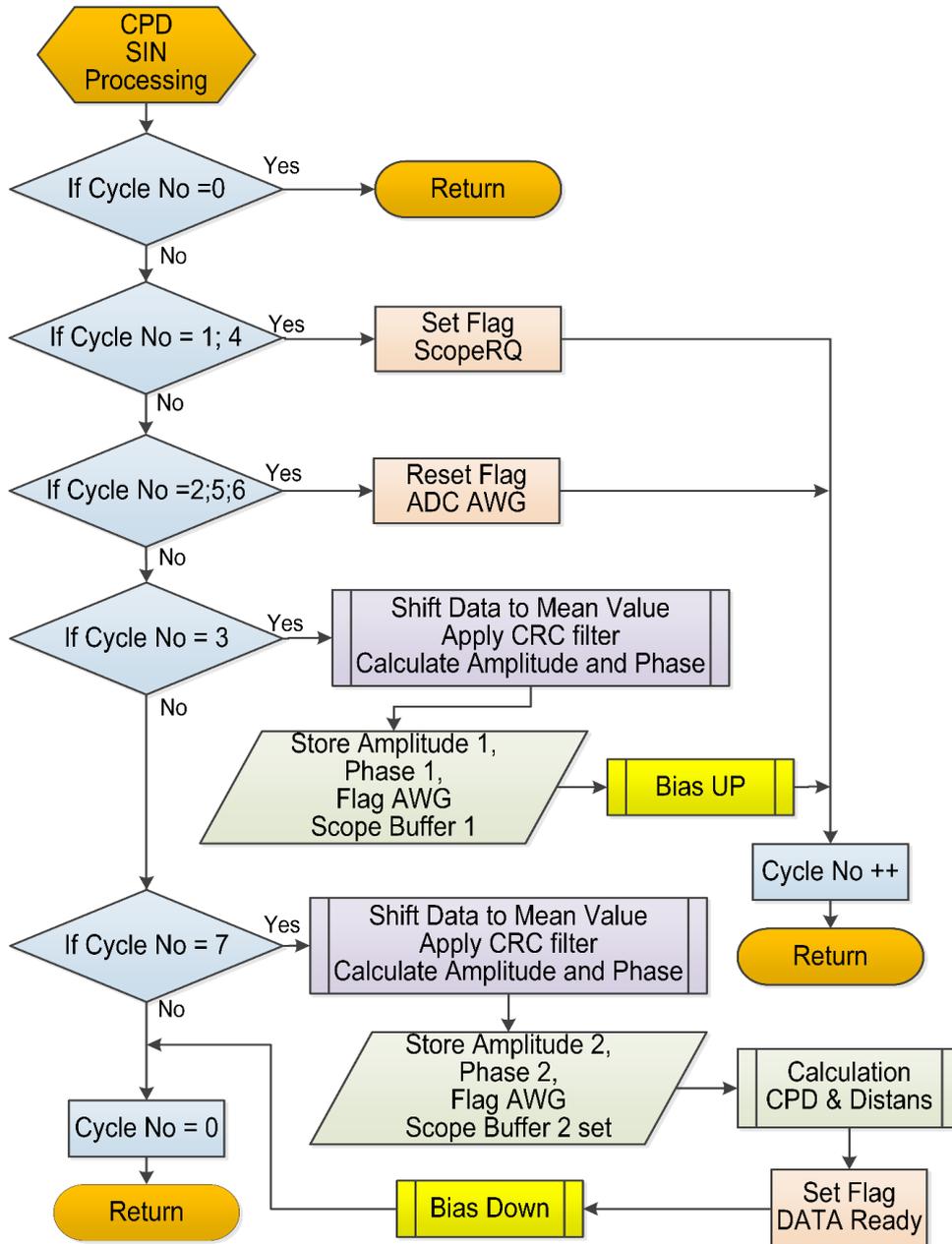


Рисунок 4 – Алгоритм обработки данных в режиме измерения контактной разности потенциалов (MODE CPD)

Figure 4 – Data processing algorithm in the CPD mode (MODE CPD)

Режим измерения поверхностной фото-ЭДС (MODE SPV)

В режиме SPV возбуждающим воздействием является синусоидально модулированный свет двух длин волн красный (Red) и инфракрасный (IRed).

Как упоминалось ранее, в аналоговых устройствах используется освещение с двумя различными длинами волн с различными частотами синусоидальной модуляции.

Сигналы разделяются синхронным детектированием на два канала с последующим определением амплитудно-частотных параметров.

При цифровой обработке представляется целесообразным временное разделение сигналов отклика фото-ЭДС от возбуждения разными длинами волн. В таком случае исключается взаимовлияние откликов фото-ЭДС, а также использование только одного канала исключает погрешности от рассогласования каналов.

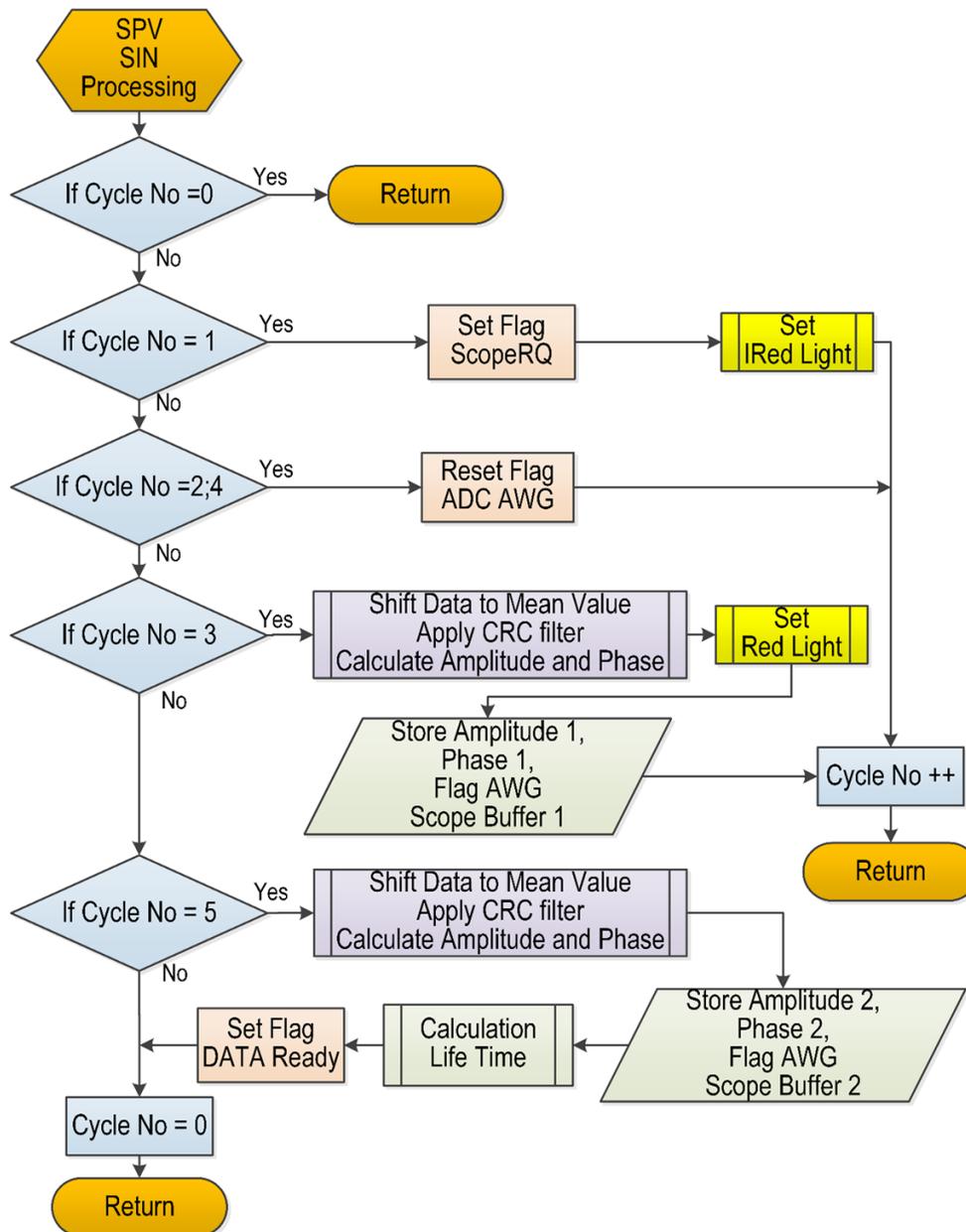


Рисунок 5 – Алгоритм обработки данных в режиме измерения поверхностной фото-ЭДС (MODE SPV)

Figure 5 – Data processing algorithm in SPV mode (MODE SPV)

На рисунке 5 приведён алгоритм обработки данных в режиме SPV (MODE SPV). Измерение и обработка в этом режиме производится за пять циклов. Реальная обработка данных происходит только в 3 и 5 циклах, причем в 3 цикле данные получают при освещении инфракрасным светом (IRed), а в 5 – при красном (Red). Переключение света осуществляется в 3 и 5 циклах. В цикле 1 устанавливается Flag_ScopeRQ, инициирующий передачи осциллографических массивов Scope. Во 2 и 4 циклах осуществляется сброс

AWG, а в 5 цикле производятся окончательные расчёты, заполняется буфер конечных данных и устанавливается флаг DATA_Ready.

Режим измерения барьерной фото-ЭДС (MODE JPV)

В этом режиме фото-ЭДС используется для генерирования электрических зарядов в полупроводнике, а с помощью нескольких зондов, находящихся на различном расстоянии

от светового пятна, определяется характер растекания зарядов. Это позволяет определять электросопротивление, а также, при наличии мелких p - n -переходов, барьерную фото-ЭДС

(JPV). При инициализации режима пользователь может выбрать красный или инфракрасный источник освещения, что определяет глубину генерации зарядов.

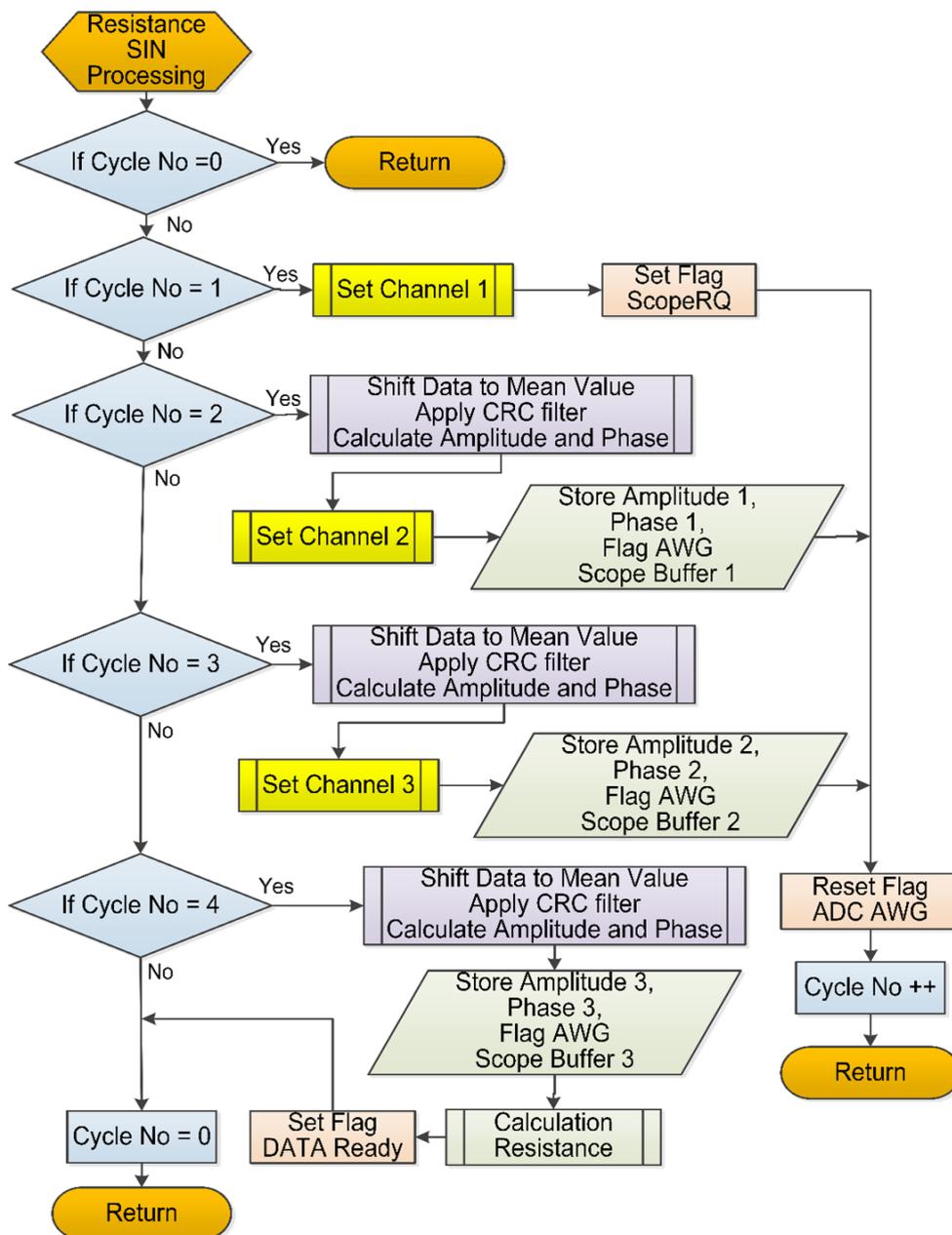


Рисунок 6 – Алгоритм обработки данных в режиме измерения барьерной фото-ЭДС (MODE JPV)

Figure 6 – Data processing algorithm in JPV mode (MODE JPV)

На рисунке 6 приведён алгоритм обработки данных в режиме JPV (MODE JPV). В этом режиме измерение и обработка производится за четыре цикла. Реальная обработка данных происходит во 2, 3 и 4 циклах, причём в каждом из измерительных циклов данные получают от различных каналов усиления

(зонда). Переключение каналов осуществляется внутренними средствами микроконтроллера. Пустые циклы не используются, т.к. нет необходимости ожидания установления переходных процессов. В этом режиме даже желательно максимально быстро опросить зонды. В цикле 1 устанавливается Flag_ScopeRQ,

инициирующий передачу осциллографических массивов Score. Сброс AWG происходит во всех циклах. В 5 цикле производятся окончательные расчёты, заполняется буфер конечных данных и устанавливается флаг DATA_Ready.

Результаты тестирования универсального цифрового зондового электрометра

Тестирование осуществлялось при работе зондового электрометра в составе сканирующей

системы. В качестве тестовой использовалась полупроводниковая пластина со слоем окисла, на которой ранее осуществлялась настройка системы осаждения зарядов коронным разрядом в различных режимах. В результате осаждения избыточного заряда произошёл пробой оксидного слоя, что создало дефектную область. С помощью полученной пластины осуществлялась настройка и тестирование разработанного зондового электрометра.

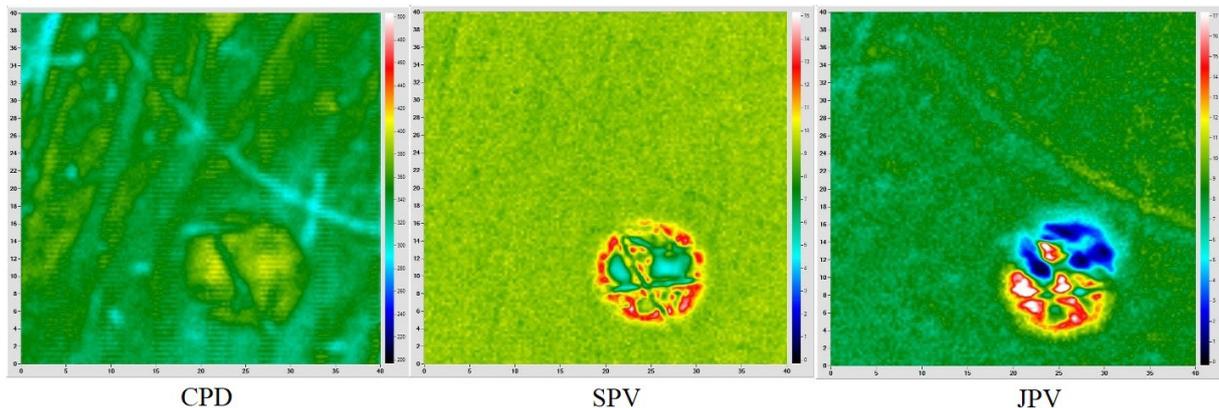


Рисунок 7 – Результаты тестирования разработанного зонда в режимах измерения контактной разности потенциалов (MODE CPD), поверхностной фото-ЭДС (MODE SPV), барьерной фото-ЭДС (MODE JPV)

Figure 7 – Results of testing the developed probe in CPD, SPV and JPV modes

Как видно из рисунка 7 дефект выявляется во всех режимах. Однако в режиме JPV возможно более детальное выделение структуры дефекта. Следует отметить, что пластина долгое время использовалась в лабораторных условиях при настройке зондового электрометра и была загрязнена. Загрязнения поверхности выявились в режиме CPD, в котором информация формируется с поверхности. В режимах SPV и JPV информация формируется от подповерхностных слоев (на глубине эффективного поглощения света). Поэтому загрязнения поверхности, практически, не выявляются в этих режимах.

Заключение

Использование современных микроконтроллеров при построении измерительных систем открывает широкие перспективы. При проектировании измерительных систем важно учитывать особенности и возможности периферийных устройств используемого микроконтроллера. Оптимальное распределение

измерительных манипуляций между периферийными устройствами, а также между ними и процессором, позволяет создавать измерительные системы с требуемым уровнем надёжности и бесперебойности.

Цифровая обработка и фильтрация первичных данных в режиме реального времени средствами цифровой обработки сигналов (DSP) микроконтроллера значительно снижает уровень шумов и случайных наводок, т. е. повышает точность и воспроизводимость получаемых результатов. Отсутствие необходимых в аналоговых системах синхронного детектирования с последующим интегрированием уменьшает время измерений, что существенно при работе устройств в составе сканирующих систем, обеспечивающих картирование результатов.

Разработанный универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин реализует основные бесконтактные электрические методы в одном устройстве. Управление электрометром, т. е. передача полученных данных, изменение

конфигурации, удалённое тестирование и калибровка, осуществляется по цифровым каналам локального управления.

На базе разработанного цифрового зондового электрометра созданы системы сканирования полупроводниковых пластин для ОАО «Интеграл» (Беларусь).

Список использованных источников

1. Komin V.V. [et al.]. Status of Non-contact Electrical Measurements. AIP Conference Proceedings, 2003, 683, 782. DOI: 10.1063/1.1622559

2. Shroeder D.K. Contactless surface charge semiconductor characterization. Materials Science and Engineering. – 2002. – № 91–92. – Pp. 196–210.

3. Kronik L., Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. Surface Science Reports. – 1999. – Vol. 37. – Pp. 1–206.

4. Воробей Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2. – С. 67–72.

5. Пилипенко В.А. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В.А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 344–356. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-24-31

6. Zharin A., Pantsialeveu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2. – No. 4. – Pp. 17–21.

7. Tyavlovsky A., Zharin A., Mikitsevich V., Vorobey R. Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2. – No. 4. – Pp. 47–51.

8. Pantsialeveu K., Zharin A., Mikitsevich V., Gusev O. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2. – No. 5. – Pp. 11–14.

9. Жарин А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Минск: Бестпринт. – 1996. – 235 с.

10. Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич,

А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 7–15.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

11. Микитевич В.А. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение–отклик / В.А. Микитевич [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14. – № 1. – С. 18–26.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

12. Пантелеев К.В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – № 2. – С. 136–144. DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144

References

1. Komin VV, Bello AF, Brundle CR, Urisky YS. Status of Non-contact Electrical Measurements. AIP Conference Proceedings. 2003;683(782).

DOI: 10.1063/1.1622559

2. Shroeder DK. Contactless surface charge semiconductor characterization. Materials Science and Engineering. 2002;(91-92):196-210.

3. Kronik L, Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. Surface Science Reports. 1999;37:1-206.

4. Vorobey RI, Gusev OK, Zharin AL, et al. Study of silicon-insulator structure defects based on analysis of a spatial distribution of a semiconductor wafers' surface potential. Devices and Methods of Measurements. 2013;(2):67-72. (In Russ.).

5. Pilipenko VA, Saladukha VA, Filipenya VA, Vorobey RI, Gusev OK, Zharin AL. Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry. Devices and Methods of Measurements. 2017;8(4):344-356. (In Russ.)

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-24-31

6. A. Zharin, K. Pantsialeveu, A. Svistun, K. Tyavlovsky. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020;2(4):17-21.

7. A. Tyavlovsky, A. Zharin, V. Mikitsevich, R. Vorobey. Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020;2(4):47-51.

8. K. Pantsialeveu, A. Zharin, V. Mikitsevich, O. Gusev. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020;2(5):11-14.

9. Zharin AL. Contact Potential Difference Technique and Its Application in Tribology. Minsk: Bestprint Publishing; 1996. 235 p.

10. Pantsialeyeu KU, Mikitsevich UA, Zharin AL. Design of the contact potentials difference probes. *Devices and Methods of Measurements*. 2016;7(1):7-15. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

11. Mikitsevich UA, Svistun AI, Samarina AV, Pantsialeyeu KU, Zharin AL. Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal Excitation Response. *De-*

vices and Methods of Measurements. 2023;14(1):18-26. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

12. Pantsialeyeu KU, Svistun AI, Tyavlovsky AK, Zharin AL. Digital contact potential difference probe. *Devices and Methods of Measurements*. 2016;7(2):136-144. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144