

УДК 621.382

МАЛОГАБАРИТНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЗОНД ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. К. ТЯВЛОВСКИЙ, А. Л. ЖАРИН, А. И. СВИСТУН, А. В. САМАРИНА, К. В. ПАНТЕЛЕЕВ, В. А. МИКИТЕВИЧ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

UDC 621.382

A SMALL-SIZED SCANNING ELECTROMETRIC PROBE FOR SEMICONDUCTOR AND NANOSTRUCTURED MATERIALS SURFACE DEFECT CONTROL

A. K. TYAVLOVSKY, A. L. ZHARIN, A. I. SVISTUN, A. V. SAMARINA, K. U. PANTSIALEYEU, U. A. MIKITSEVICH

Аннотация. Рассмотрены вопросы проектирования и особенности конструкции малогабаритного сканирующего электрометрического зонда, предназначенного для неразрушающего контроля дефектов поверхности полупроводниковых и наноструктурированных материалов. Повышение отношения сигнал/шум при высокоскоростном сканировании обеспечивается использованием в схеме управления приводом вибрации электрометрического зонда интегрального драйвера пьезоэлектрического привода DRV8662 со встроенным повышающим импульсным преобразователем напряжения. Уменьшение габаритов измерительного преобразователя обеспечило повышение пространственного разрешения при выявлении малоразмерных дефектов в соответствии с современными требованиями.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефекты поверхности, электрометрия, сканирование, зонд Кельвина.

Abstract. Development and design of a small-sized scanning electrometric probe for semiconductor and nanostructured materials surface defect control are discussed. Improvement in signal-to-noise ratio is achieved by designing the vibration control system for electrometric probe on a basis of DRV8662 piezo haptic driver with integrated boost converter. Minimization of measuring transducer dimensions allowed improving the lateral resolution of a probe in accordance with current requirements.

Keywords: non-destructive testing, surface defects, electrometry, scanning, Kelvin probe.

При производстве изделий микроэлектроники, микромеханики и сенсорики по наиболее распространенной на сегодняшний день планарной технологии определяющую роль для качества продукции, количественно определяемого процентом выхода годных изделий, играет состояние поверхности подложек (полупроводниковых пластин), используемых для формирования приборных структур. Локальные изменения данного состояния, вызванные действием случайных факторов и, соответственно, имеющие случайное распределение по поверхности пластины, относят к дефектам поверхности. Их источником могут

быть как неидеальности исходного полупроводникового кристалла, так и технологические операции, выполняемые в процессе изготовления приборных структур (окисление, отжиг, имплантация, эпитаксия и т. д.). Физическая природа возникающих при этом дефектов чрезвычайно разнообразна: к типичным дефектам, влияющим на характеристики приборных структур современной микроэлектроники, относят, в частности, дислокации кристаллической решетки полупроводника, неравномерное распределение легирующей примеси и химические загрязнения, механические напряжения, микротрещины, поверхностные состояния на границах раздела, неравномерность эквивалентной электрической толщины диэлектрического слоя, фиксированный и подвижный заряд в диэлектрике и др. (рис. 1). Существенным источником дефектов являются посторонние частицы, осаждаемые на поверхности и границах раздела слоев полупроводниковых структур в ходе технологических операций, а также просто при транспортировке и хранении пластин между технологическими операциями.

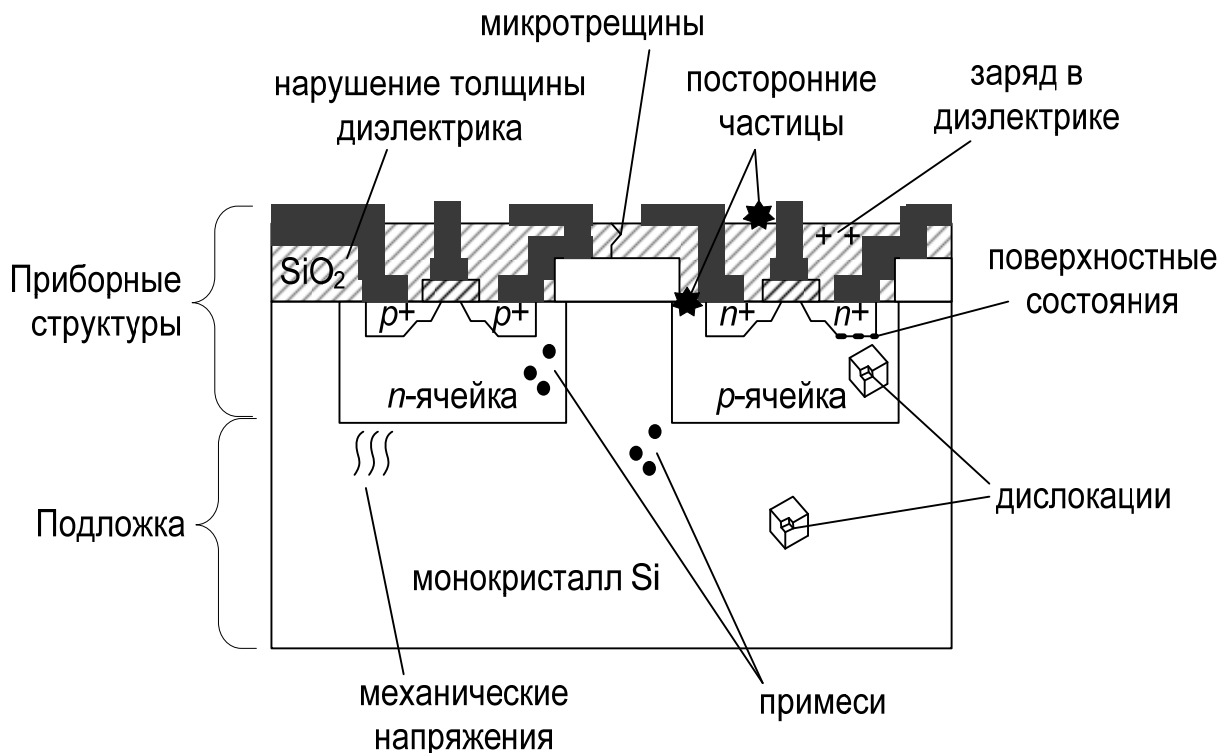


Рис. 1. Дефекты полупроводниковых структур

Уменьшение характерных размеров структурных элементов интегральных микросхем (ИМС) приводит к необходимости выявления дефектов с характерными размерами много меньше длины волны видимого оптического излучения, что делает их недоступными оптическим методам контроля. Кроме того, ряд перечисленных дефектов (поверхностные состояния, заряд в диэлектрике и др.) не относятся к структурным дефектам, обнаруживаемым прямым наблюдением. Современные требования, сформулированные в Перспективном плане *International Roadmap for Devices and Systems* по состоянию

на 2021 г. [1], устанавливают необходимость выявления дефектов поверхности полупроводника с характерными размерами от 3,5 нм, причем количество таких дефектов не должно превышать в среднем 133,5 на пластине диаметром 300 мм. Среднее количество дефектов с характерным размером 10,0 нм не должно превышать 5,7, а с характерным размером 20,0 нм – 0,7 на пластину диаметром 300 мм, т. е. в среднем менее одного дефекта на пластину. С учетом счетного количества допустимых дефектов Перспективный план прямо устанавливает необходимость не только выявления, но и картирования пространственного распределения дефектов по поверхности полупроводниковых пластин.

Разработанный с учетом этих требований в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ комплекс зондовых электрометрических методов и средств неразрушающего контроля полупроводниковых пластин использует для выявления и картирования дефектов метод сканирующего зонда Кельвина, основанный на определении локальных отклонений работы выхода электрона исследуемой поверхности [2]. Работа выхода электрона (РВЭ) является универсальной физической характеристикой, отражающей изменения любых электрофизических свойств поверхности, что позволяет выявлять дефекты различной физической природы с высокой чувствительностью. Достоинствами метода являются его бесконтактность и полное отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на поверхность. При этом благодаря эффекту усреднения значений РВЭ под чувствительным элементом зонда обеспечивается выявление дефектов с характерными размерами много меньше поперечных размеров зонда при любом отличии РВЭ дефектов от РВЭ поверхности полупроводника (как в большую, так и в меньшую сторону). Непосредственно измеряемой таким зондом величиной является так называемая контактная разность потенциалов (КРП), пропорциональная разности значений РВЭ зонда и исследуемой поверхности. Таким образом, измерения РВЭ сканирующим зондом Кельвина являются не абсолютными, а относительными.

Пространственная разрешающая способность сканирующего зонда Кельвина определяется его поперечными размерами. Существенно, что каких-либо фундаментальных ограничений на минимальные размеры зонда не имеется. Так, известна реализация режима зонда Кельвина в атомно-силовой микроскопии [3]. В то же время увеличение пространственной разрешающей способности при той же заданной площади исследуемого объекта влечет за собой увеличение времени измерений вследствие необходимости получения большего числа отсчетов. Это требует соответствующего повышения быстродействия электрометрического зонда, что может быть достигнуто за счет использования схемотехнических решений, обеспечивающих меньшее время установления выходного сигнала.

Наибольшее распространение получила компенсационная схема измерения КРП (рис. 2, а), реализующая нулевой метод измерения, предусматривающий полную компенсацию сигнала КРП U_{CPD} напряжением обратной связи U_{out} , для

чего в цепь отрицательной обратной связи включается интегрирующее звено 7. Напряжение обратной связи, численно равно КРП (с обратным знаком), используется в этой схеме в качестве выходного сигнала. Быстродействие аналоговой компенсационной схемы принципиально ограничено инерционностью интегрирующего звена в схеме формирования сигнала.

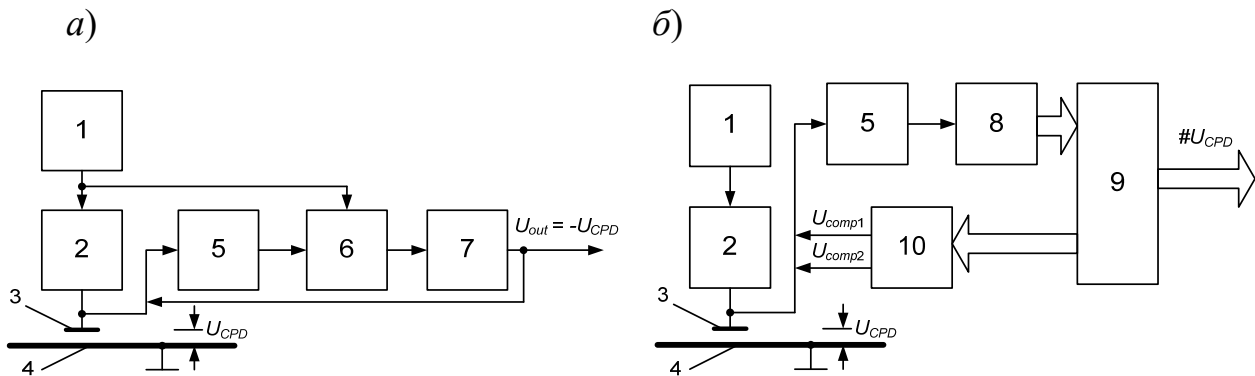


Рис. 2. Варианты схемотехнического решения измерительного преобразователя сканирующего зонда Кельвина: *а* – аналоговый компенсационный зонд Кельвина; *б* – цифровой зонд Кельвина; 1 – генератор синусоидальных колебаний; 2 – привод вибрации зонда; 3 – вибрирующий чувствительный элемент зонда Кельвина; 4 – исследуемая поверхность; 5 – усилитель; 6 – синхронный детектор; 7 – интегратор; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – микроконтроллер; 10 – источник фиксированных напряжений компенсации

Для исключения инерционного интегрирующего звена, а также с целью расширения диапазона измерений КРП и исключения погрешностей, связанных с работой усилителя 5 в режиме малого сигнала, авторами исследования разработана и практически реализована схема так называемого «цифрового» сканирующего зонда Кельвина [4], работающего в режиме неполной компенсации измерительного сигнала (рис. 2, *б*). В этом случае вместо компенсации входного сигнала U_{CPD} непрерывно изменяющимся напряжением обратной связи, вырабатываемым интегратором, в качестве напряжения компенсации на вход схемы по командам микроконтроллера 9 поочередно подаются два фиксированных напряжения U_{comp1} и U_{comp2} , не обеспечивающие полную компенсацию входного сигнала. Разностный переменный сигнал в обоих случаях анализируется микроконтроллером 9, а действительное значение КРП, передаваемое на выход схемы в цифровой форме, вычисляется на основе математической обработки двух полученных значений разностного сигнала. Использование фиксированных напряжений компенсации позволяет более чем на порядок сократить время переходных процессов в схеме и, соответственно, время установления выходного сигнала по сравнению со схемой аналогового зонда Кельвина (см. рис. 2, *а*). В то же время необходимо учитывать, что выходной сигнал чувствительного элемента вибрирующего чувствительного элемента зонда Кельвина представляет собой сигнал переменного напряжения

сложного гармонического состава [5]. В схеме аналогового компенсационного зонда Кельвина амплитуда этого сигнала за счет работы цепи компенсации приводится к нулю, а детектирование сигнала ошибки, представляющего собой переменное напряжение, обеспечивается синхронным детектором 6, связанным с генератором синусоидальных колебаний 1. Схема цифрового зонда Кельвина не содержит синхронного детектора, поскольку предусматривает работу непосредственно с переменным разностным сигналом. Вследствие этого к генератору синусоидальных колебаний 1 предъявляются повышенные требования не только в части компактности, но и в части минимизации наводок, создаваемых генератором на измерительной части схемы.

С учетом этих требований была разработана и реализована схема генератора синусоидальных колебаний для привода вибрации электрометрического зонда на основе интегрального драйвера пьезоэлектрического привода DRV8662 (рис. 3). Важным преимуществом данного драйвера является наличие встроенного повышающего импульсного преобразователя напряжения (*Boost converter*), что позволяет осуществлять питание генератора единым напряжением +5 В [6]. Пьезоэлектрический привод 3 подключается непосредственно к выходу интегрального драйвера, при этом все относительно высоковольтные цепи питания пьезоэлектрического привода, способные являться источниками электромагнитных наводок, практически полностью сосредоточены внутри корпуса драйвера, чем обеспечивается их эффективное экранирование.

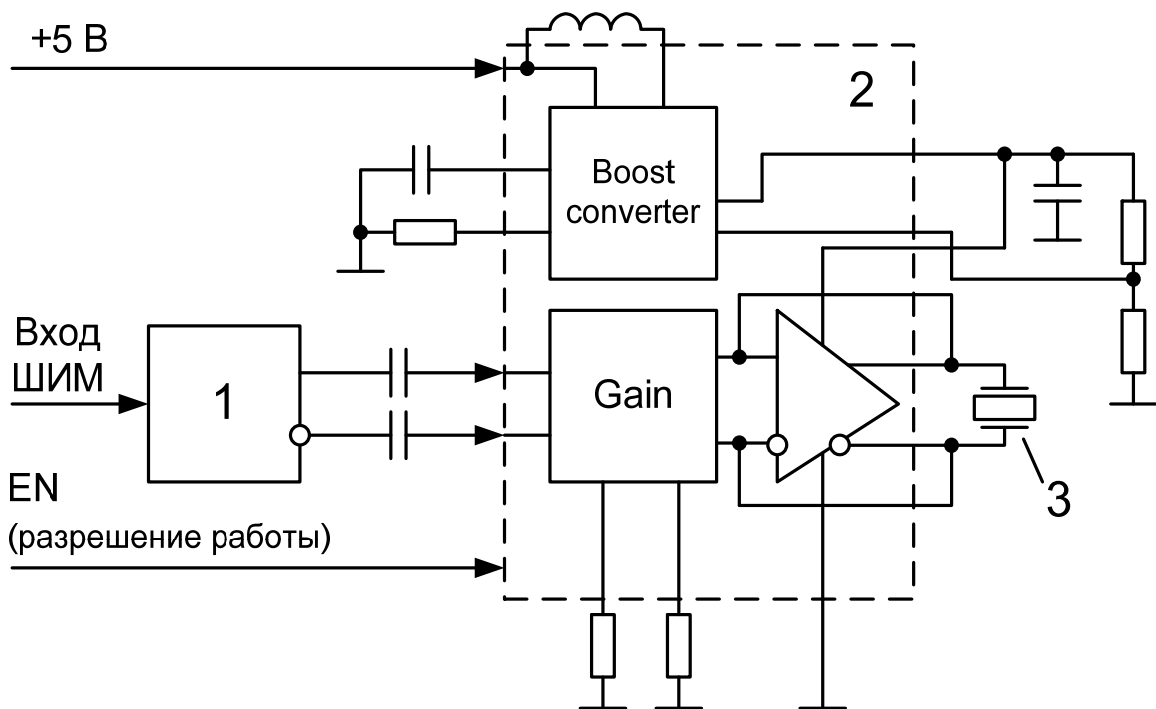


Рис. 3. Привод вибрации электрометрического зонда на основе интегрального драйвера DRV8662: 1 – формирователь дифференциального сигнала; 2 – интегральный драйвер пьезоэлектрического привода DRV8662; 3 – пьезоэлектрический привод

В реализованной схеме управление драйвером осуществляется сигналом широтно-импульсной модуляции (ШИМ), вырабатываемым управляющим микроконтроллером (см. рис. 2, б). Таким образом, как обработка измерительных сигналов, так и управление вибрацией зонда осуществляются цифровым методом с помощью единого управляющего узла, чем обеспечивается высокая стабильность работы цифрового зонда Кельвина. Поскольку для управления пьезоэлектрическим приводом используется дифференциальный сигнал, в схему привода вибрации включен формирователь дифференциального сигнала 1. Помимо данного формирователя и собственно драйвера DRV8662, схема содержит минимальное количество компонентов, необходимых для нормальной работы драйвера. Амплитуда вырабатываемого сигнала регулируется встроенным в драйвер регулятором *Gain*, частота определяется входным сигналом ШИМ.

Рассмотренные схемотехнические решения позволяют значительно (более чем на порядок) повысить быстродействие цифрового зонда Кельвина по сравнению с аналоговым при меньших габаритах электронных узлов, что способствует повышению компактности измерительного преобразователя и достижению пространственной разрешающей способности контроля в соответствии с современными и перспективными требованиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Roadmap for Devices and Systems. 2021 Update: Yield Enhancement [Electronic resource]. – Mode of access: https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS_YE.pdf. – Data of access: 25.07.2022.
2. Scanning photostimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters / A. Tyavlovsky [et al.] // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2, iss. 4. – P. 47–51.
3. **Zharin, A. L.** Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A. L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. – P. 687–720.
4. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.
5. Kelvin probe error compensation based on harmonic analysis of measurement signal / A. K. Tyavlovsky [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2014. – № 3. – P. 251–254.
6. DRV8662 Piezo Haptic Driver with Integrated Boost Converter [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8662.pdf>. – Data of access: 25.07.2022.

E-mail: tyavlovsky@bntu.by, nil_pt@bntu.by.