

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Fraden, J. Handbook of Modern Sensors. Physics, Design and Applications. 4th Ed. / J. Fraden. – New York: Springer, 2010. – 681 p.
2. Zhang, J. Molecular Sensors and Nanodevices. 2nd Ed. / J. Zhang, K. Hoshino. – Berlin: Elsevier, 2019. – 581 p.
3. Development and Application of Resistance Strain Force Sensors / Y. Zhao [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – P. 5826 (1–18).
4. Abdurakhmanov, G. Electrical conduction in doped silicate glass (thick film resistors) / G. Abdurakhmanov // New Insights into Physical Sciences / London-Hooghly: Book Publishers International, 2020. – Vol. 4. – P. 47–71.
5. Handbook of Sensors and Actuators: Thick-films Sensors / Edited by M. Prudentizati. – Amsterdam: Elsevier, 1994. – 477 p.
6. Zheng, Y. An explanation of thermal behaviour of thick film strain gauges / Y. Zheng, J. Atkinson and R. Sion // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – Vol. 36. – P. 1153–1158.
7. An evaluation of some commercial thick film resistor materials for strain gauges / Hrovat M. [et al.] // J. Mater. Sci. Lett. – 1994. – Vol. 13. – P. 992–995.
8. Abdurakhmanov, G. Modern Physics of Thermoelectric Phenomena: Achievements and Problems / G. Abdurakhmanov, D. P. Rai and G. Vokhidova // New Materials and Devices for Thermoelectric Power Generation / Ed. by B. I. A Ismail. – London: IntechOpen, 2023. – P. 119–142.
9. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах: в 2-х т. Пер. с англ. / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1982. – Т. 1. – 368 с.

ГРАДИЕНТНЫЕ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

**А. К. Тявловский, А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич,
О. К. Гусев, Р. И. Воробей**

*Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65,
220013 Минск, Беларусь,
e-mail: tyavlovsky@bntu.by*

Для повышения быстродействия при картировании дефектов поверхности полупроводниковой пластины методом сканирующего зонда Кельвина предложено использование невибрирующего электрометрического зонда. По результатам полунатурного моделирования показано, что получаемое с помощью такого зонда градиентное электропотенциальное изображение обеспечивает эффективное выявление таких дефектов, как кристаллические дислокации и локальные загрязнения поверхности полупроводниковой пластины. Путем интегрирования измерительного сигнала невибрирующего зонда может быть получена также карта распределения контактной разности потенциалов, аналогичная получаемой традиционным методом вибрирующего зонда Кельвина-Зисмана, что позволяет выявлять также такие дефекты, как неравномерность эквивалентной электрической толщины окисла или неравномерность распределения примеси.

Ключевые слова: полупроводниковая пластина; поверхность; дефект; контактная разность потенциалов; зонд Кельвина.

GRADIENT ELECTROPOTENTIAL IMAGES IN NON-DESTRUCTIVE MAPPING OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES' SURFACE

A. K. Tyavlovsky, A. L. Zharin, K. V. Pantsialeu, V. A. Mikitsevich,
O. K. Gusev, R. I. Vorobey

Belarusian National Technical University, Nezavisimosti av. 65, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: A. K. Tyavlovsky (tyavlovsky@bntu.by)

To increase the speed of mapping surface defects of semiconductor wafer with a scanning Kelvin probe a non-vibrating electrometric probe technique is proposed. Based on the results of semi-natural modeling, it is shown that the gradient electropotential image obtained using such a probe provides effective detection of defects such as crystalline dislocations and local contamination of the surface of the semiconductor wafer. By integrating the measuring signal of a non-vibrating probe, a map of the distribution of the contact potential difference can also be obtained, similar to that obtained by the traditional Kelvin-Zisman vibrating probe technique, which also makes it possible to detect defects such as unevenness of the equivalent electrical thickness of the oxide or unevenness of impurity distribution.

Key words: semiconductor wafer, surface, defect, contact potential difference, Kelvin probe.

ВВЕДЕНИЕ

Методы зондовой электрометрии, в частности, метод сканирующего зонда Кельвина (СКП) [1], находят достаточно широкое применение в неразрушающем контроле поверхности полупроводниковых пластин благодаря таким их достоинствам, как высокая поверхностная чувствительность, позволяющая осуществлять контроль тонких эпитаксиальных слоев, нетребовательность к условиям окружающей среды (измерения могут выполняться без вакуумирования, при нормальном атмосферном давлении), отсутствие механического контакта с исследуемой поверхностью, а также возможность дополнения измерений контактной разности потенциалов (КРП) неразрушающими внешними воздействиями (освещением, нагревом, коронным разрядом), что позволяет определять различные электрофизические характеристики поверхности полупроводниковой пластины, такие как: время жизни или длина диффузии неосновных носителей заряда, удельное поверхностное сопротивление, концентрация примеси железа и др. В период 2009–2020 гг. коллективом НИЛ полупроводниковой техники БНТУ на основе данных методов разработан комплекс зондовых зарядочувствительных установок и методик для бесконтактного контроля и визуализации пространственного распределения электрофизических характеристик кремниевых пластин диаметром до 200 мм. Входящие в комплекс установки и методики используются на ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» для контроля технологии изготовления субмикронных интегральных схем и разработки новых технологий, включены в стандарт предприятия «Методы контроля параметров материалов и полупроводниковых структур». Использование методов зондовой электрометрии обеспечивает возможность сплошного неразрушающего контроля и своевременного выявления брака на всех стадиях технологического процесса производства полупроводниковых структур, что позволяет получить информацию об откло-

нениях параметров технологического процесса на ранних стадиях и за счет этого уменьшить процент брака и повысить процент выхода годных изделий. В то же время, опыт практического применения данных установок и методик в технологическом контроле показал, что существенными недостатками реализованных методов являются большое время сканирования при построении визуализированного изображения поверхности полупроводниковой пластины и, в ряде случаев, сложность интерпретации особенностей визуализированного электропотенциального изображения как дефектов поверхности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным фактором, ограничивающим быстродействие электрометрического зонда Кельвина на основе вибрирующего конденсатора, является частота вибрации зонда и необходимость завершения нескольких полных колебаний зонда для получения установившегося сигнала. При использовании классического компенсационного метода измерения КРП (метода Кельвина-Зисмана [2]), вследствие инерционности цепи автокомпенсации, количество таких колебаний может достигать ста и более, что при типичных значениях частоты вибрации 300...600 Гц определяет минимальное время измерения в каждой точке поверхности пластины 0,5...1 с. Это не позволяет сделать количество таких точек большим, что необходимо для картирования поверхности пластины с высоким пространственным разрешением [3]. Измерения в режиме неполной компенсации сигнала [4] позволяют сократить время единичного измерения практически на десятичный порядок (до 0,1 с), однако и в этом случае полное время сканирования поверхности полупроводниковой пластины диаметром 20 см с пространственным разрешением порядка 1 мм превышает 1 ч.

Существенного повышения быстродействия можно добиться, перейдя к использованию метода невибрирующего зонда Кельвина [5], при котором вибрация чувствительного элемента в направлении, перпендикулярном исследуемой поверхности, не осуществляется. При латеральном движении зонда параллельно исследуемой поверхности (рис. 1) его выходной токовый сигнал определяется выражением:

$$i = U_{CPD} \frac{dC}{dt} + C \frac{dU_{CPD}}{dt} = -U_{CPD} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d^2} \frac{dd}{dt} + C \frac{dU_{CPD}}{dt} \quad (1)$$

где U_{CPD} – КРП, C – емкость динамического конденсатора (электрическая емкость между зондом Кельвина и поверхностью полупроводниковой пластины), ε_0 – электрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздуха) в зазоре зонд-пластина, S – площадь чувствительного элемента зонда, d – расстояние между чувствительным элементом и поверхностью пластины.

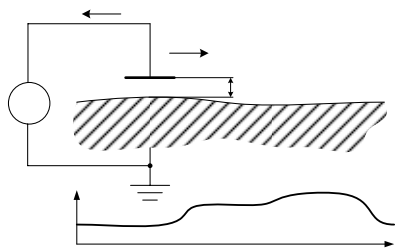


Рис.1. Схема формирования измерительного сигнала невибрирующего зонда Кельвина

Согласно (1), выходной сигнал невибрирующего зонда Кельвина включает две составляющих: геометрическую, определяемую вариациями электрической емкости между зондом и поверхностью полупроводниковой пластины в процессе его латерального движения и связанную с изменениями величины зазора зонд-пластина, вызванными отклонениями (погрешностями) геометрии поверхности, и электропотенциальную, определяемую различием значений КРП на разных участках поверхности. Полупроводниковые пластины относятся к изделиям с прецизионными поверхностями, для которых погрешности геометрии, в том числе высота шероховатостей, пренебрежимо малы в сравнении с принятой в рамках настоящего исследования величиной зазора зонд-пластина (не менее 0,1 мм). В этом случае геометрической составляющей измерительного сигнала можно пренебречь, упростив выражение (1) до вида:

$$i = C \frac{dU_{CPD}}{dt} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \frac{dU_{CPD}}{dt} . \quad (1, a)$$

При движении зонда Кельвина с постоянной скоростью v данное выражение принимает вид:

$$i = v \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \frac{dU_{CPD}}{dx} \quad (2)$$

Таким образом, результат измерения характеризует градиент КРП $\frac{dU_{CPD}}{dx}$ вдоль линии сканирования. Значения КРП могут быть восстановлены путем интегрирования выходного токового сигнала невибрирующего зонда Кельвина по времени:

$$U_{CPD} = \frac{d}{\epsilon\epsilon_0 S} \int i dt . \quad (3)$$

Результат интегрирования будет содержать неизвестную константу, то есть будет смещенным. В то же время, физически значения КРП определяются разностью значений работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности зонда Кельвина Φ_{probe} и исследуемой пластины Φ_{sample} , отнесенной к элементарному заряду (заряду электрона) e :

$$U_{CPD} = \frac{\Phi_{probe} - \Phi_{sample}}{e} \quad (4)$$

причем величина Φ_{probe} неопределима существующими методами и, таким образом, также рассматривается как неизвестная константа [6]. Из этого можно сделать вывод, что по отношению к РВЭ Φ_{sample} , являющейся абсолютной физической характеристикой поверхности (в отличие от относительной характеристики, которой является КРП), использование метода невибрирующего зонда Кельвина для объекта с прецизионной поверхностью не приводит к снижению информативности исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Было выполнено полунатурное моделирование исследования поверхности полупроводниковых пластин методом невибрирующего зонда Кельвина. В качестве исходных данных для моделирования использовались результаты сканирования вибрирующим зондом Кельвина-Зисмана реальных полупроводниковых пластин диаметром 10 см, для которых было известно наличие определенных типов дефектов поверхности (рис. 1, а, б и в). Далее методом компьютерного математического моделирования определялось пространственное распределение измерительного сигнала

виртуального невибрирующего зонда Кельвина, осуществляющего построчное сканирование поверхности с заданным распределением КРП вдоль координаты X с постоянной скоростью в направлении слева направо. Площадь чувствительного элемента задавалась $S = 1 \text{ мм}^2$, что соответствует параметрам реального зонда Кельвина-Зисмана, с помощью которого были получены исходные изображения, величина зазора $d = 0,1 \text{ мм}$, скорость сканирования $v = 10 \text{ мм/с}$. В результате были получены градиентные электропотенциальные изображения, приведенные на рис. 2, $з$, $д$ и $е$.

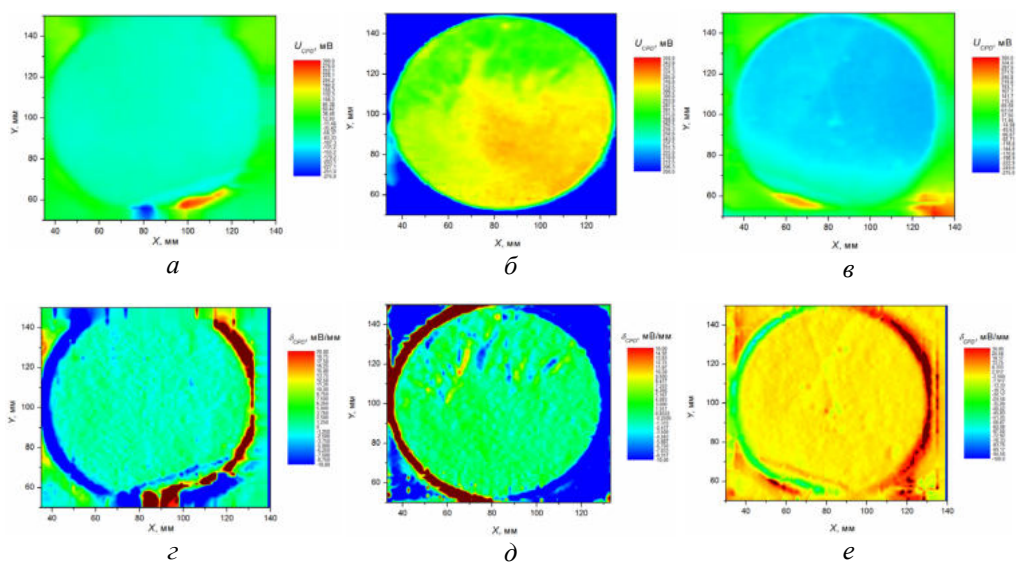


Рис. 2. Электропотенциальные изображения полупроводниковых кремниевых пластин, полученные методом вибрирующего (a , $б$, $в$) и невибрирующего ($з$, $д$, $е$) зонда Кельвина: a , $з$ – отсутствие значимых дефектов; $б$, $д$ – неоднородность состава и эквивалентной толщины окисного слоя; $в$, $е$ – кристалл с винтовой дислокацией

Несмотря на то, что внешний вид электропотенциальных изображений, построенных с использованием вибрирующего и невибрирующего зондов, существенно различается, можно видеть, что имеющиеся дефекты поверхности проявляют себя на обоих изображениях. При этом градиентные изображения обладают, в определенных случаях, большей наглядностью, четко очерчивая контур дефектов. В частности, наблюдаемые на изображении рис. 2, $е$ прямолинейные структуры, характеризующиеся одинаковыми значениями градиента по всей длине линии, соответствуют краю винтовой дислокации в месте ее выхода на поверхность. Данный вид дефектов слабо-различим на визуализированном изображении пространственного распределения КРП рис. 2, $в$ вследствие близких (в пределах погрешности измерения) значений КРП по обеим сторонам от края дислокации, но четко проявляется на градиентном электропотенциальном изображении. С другой стороны, такой дефект, как неравномерность эквивалентной толщины окисного слоя, выявляемый по плавному изменению значений КРП на разных участках поверхности пластины, легко визуализируется на исходном изображении рис. 2, $б$, полученном методом вибрирующего зонда Кельвина-Зисмана, но недостаточно наглядно проявляется на градиентном изображении.

жении рис. 2, д вследствие отсутствия четких границ у такого рода дефектов. Следует также отметить, что знак градиента КРП определяется направлением сканирования, что наглядно видно на краях градиентных электропотенциальных изображений рис. 2, г, д и е, где происходит переход от поверхности полупроводниковой пластины к поверхности столика-держателя, характеризующихся разными значениями КРП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты полунатурного моделирования показали, что использование метода невибрирующего зонда Кельвина обеспечивает значительное (в несколько раз) сокращение времени картирования поверхности полупроводниковой пластины по сравнению с методом вибрирующего зонда Кельвина-Зисмана. Выходной измерительный сигнал невибрирующего зонда отражает величину градиента КРП вдоль линии сканирования, при этом картирование пространственного распределения градиента КРП обеспечивает эффективное выявление таких дефектов, как кристаллические дислокации и локальные загрязнения поверхности полупроводниковой пластины. Такие дефекты, как неравномерность эквивалентной электрической толщины окисла или неравномерность распределения примеси, не имеющие четко определенных границ, не могут быть эффективно выявлены картированием градиента КРП. В этом случае для восстановления исходного распределения КРП может быть использована математическая обработка (интегрирование) выходного сигнала невибрирующего зонда Кельвина, при этом необходимо учитывать наличие в обработанном сигнале неопределенной (не связанной со свойствами исследуемой полупроводниковой пластины) аддитивной составляющей (смещения). Вследствие этого полученные значения КРП не имеют прямой физической интерпретации и должны трактоваться как условные относительные величины, пространственное распределение которых прямо отражает распределение дефектов поверхности, обеспечивая тем самым их визуализацию, но не количественную оценку их физических параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. 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.
2. Shroeder, D.K. Contactless surface charge semiconductor characterization / D.K. Shroeder // *Materials Science and Engineering*. – 2002. – № 91-92. – P. 196–210.
3. McMurray, H.N. Probe diameter and probe-specimen distance dependence in the lateral resolution of a scanning Kelvin probe / H.N. McMurray, G. Williams // *J. Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 91 – P. 1673-1679; doi: 10.1063/1.1430546/
4. Digital signal processing in scanning Kelvin probe measurements / A. Zharin [et al.] // 11th International Conference New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation, Zakopane, Poland, June 25-28, 2019. – Zakopane: Lublin University of Technology, 2019. – P. 62.
5. Воробей, Р.И. Применение методологии многопараметрических измерений параметров объектов к разработке метода зондовой электрометрии на основе невибрирующего зонда Кельвина. / Воробей, Р.И. [и др.] // *Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2011»*. – 2011. – V 56. – P. 44-47.
6. Surplice, N.A. A critique of the Kelvin method of measuring work functions / N.A. Surplice, R.J. D'Arcy // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. – 1970. – Vol. 3. – P. 477–482.