

УДК 53.082.722.55

© В. В. Поляков

## КОНТАКТНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ ЕМКОСТНАЯ МИКРОСКОПИЯ БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦОВ

Обсуждается применение методики контактной сканирующей емкостной микроскопии (КСЕМ) для характеристики с высоким пространственным разрешением распределения концентрации носителей в полупроводниках на большемерных образцах с развитым рельефом. Предложены метод и устройство для реализации КСЕМ, позволяющие более чем на порядок по сравнению с известными подходами уменьшить влияние на получаемые результаты эффекта изменения паразитной емкости в процессе сканирования. Представлены соответствующие экспериментальные результаты.

Кл. сл.: СЕМ, емкостная микроскопия, АСМ, СЗМ, зондовая микроскопия, паразитная емкость

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной микроэлектроники неразрывно связано с уменьшением характерного размера элементов интегральных схем. Это обуславливает необходимость совершенствования методов, методик, а также приборного обеспечения для контроля с высоким пространственным разрешением уровней легирования полупроводниковых структур. Многообещающим является использование для этих целей специализированных методик сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), таких как методика зонда Кельвина [1], методика определения контраста сопротивления растекания [2], сканирующая емкостная микроскопия [3, 4]. Подробный сравнительный анализ указанных СЗМ-методик дан в работах [5, 6]. Представляется, что среди перечисленных наиболее перспективной является методика контактной сканирующей емкостной микроскопии (КСЕМ), применение которой обеспечивает неразрушающий контроль пространственного распределения концентрации носителей в полупроводниках с латеральным разрешением на уровне 10 нм.

### ИЗВЕСТНЫЕ СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ КСЕМ. ТРУДНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КСЕМ НА БОЛЬШЕРАЗМЕРНЫХ ОБРАЗЦАХ

В методике КСЕМ измеряются вариации емкости МДП-структуры, образованной проводящим зондом СЗМ, прижатым к тонкому слою диэлектрика на поверхности исследуемой полупроводниковой структуры (рис. 1), что позволяет судить о распределении концентрации носителей в пределах области сканирования микроскопа. На практике обычно измеряют распределение по растр

траста производной  $dC/dV$  емкости системы при некотором фиксированном напряжении между зондом и образцом.

Характерные величины электрической емкости, образованной острием зондового датчика и образцом (рис. 1), составляют по порядку величины  $10^{-17}$ – $10^{-18}$  Ф (1–10 аФ). При этом паразитные емкости  $C_1$  и  $C_2$ , образованные соответственно кантилевером и образцом, а также чипом зондового датчика и образцом, составляют в сумме около 0.5 пФ [7]. Более того, присутствующая в системе паразитная емкость изменяется в процессе сканирования; такие изменения могут достигать 100 аФ/мкм при перемещении зонда в латеральном направлении и 4 аФ/мкм при перемещении зонда по вертикали [7, 8].

Известные методы реализации КСЕМ можно разделить на электрические, в которых емкость

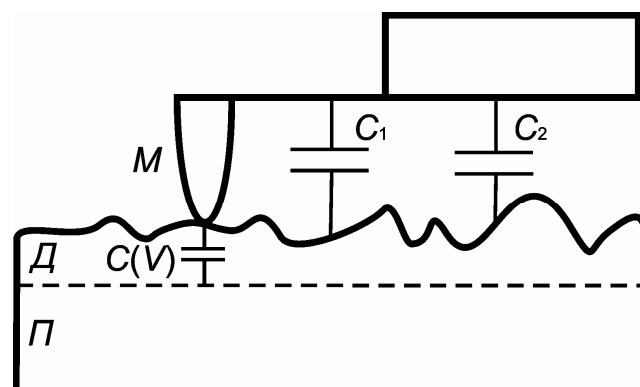


Рис. 1. Проводящий зонд СЗМ, прижатый к поверхности образца.  
 $C(V)$  — емкость, образованная кончиком иглы и образцом;  $C_1$  и  $C_2$  — паразитные емкости в системе

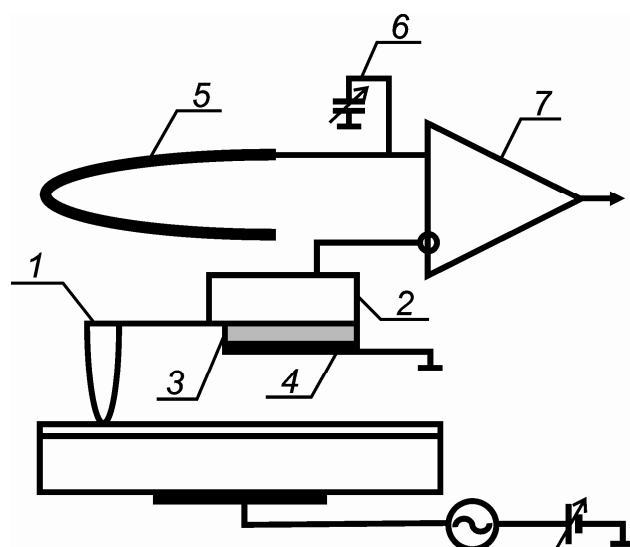
в системе измеряется с помощью электрических измерительных цепей, и электромеханические, в которых о емкостных свойствах системы судят по механическому отклику кантилевера в тех или иных условиях. Среди электромеханических методов реализации КСЕМ наиболее интересен метод "третьей гармоники" [9], применение которого позволяет получать распределение по растру микро-

скопа контраста смешанной производной  $\frac{\partial^2 C}{\partial z \partial V}$  емкости  $C$  системы (здесь  $z$  — расстояние между кантилевером и образцом). Однако при таком способе реализации КСЕМ получаемые изображения рельефа образца и емкостного контраста принципиально не являются независимыми, что является общим и наиболее существенным недостатком всех методов получения информации о вольт-фарадных характеристиках в зондовой микроскопии, в которых в конечном итоге измеряется механический отклик кантилевера. Среди электрических методов реализации КСЕМ наиболее широко применяется метод модуляции паразитной емкости, который используется, например, в выпускаемом серийно приборе компании Veeco (California, USA). Данный метод основан на использовании резонансного емкостного СВЧ-датчика для измерения малых изменений емкости в системе [10]. Уровень шумов устройства Veeco составляет  $\sim 5 \text{ аФ/Гц}^{-1/2}$  [7].

Изменения паразитной емкости (при движении зондового датчика по растру микроскопа) серьезно затрудняют применение известных подходов к реализации методики КСЕМ на большеразмерных образцах с развитым рельефом, в том числе на пластинах стандартных для микроэлектроники размеров. Подробное исследование этого эффекта можно найти в работах [7, 8]. Отчасти по этой причине измерения в КСЕМ проводят в большинстве случаев на сколах образцов, когда паразитная емкость значительно уменьшается в силу геометрии системы. В [8] предложен численный метод коррекции искажений, вызванных эффектом изменения паразитной емкости в процессе сканирования. Однако более эффективным представляется аппаратное устранение рассматриваемого паразитного эффекта, которое обеспечивается применением разработанного нами метода и устройства для реализации КСЕМ.

#### МЕТОД И УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КСЕМ

Разработанный метод состоит в следующем. Паразитная емкость в системе образована преимущественно чипом зондового датчика и образцом. Несложные оценки позволяют утверждать,



**Рис. 2.** Компенсация паразитной емкости с использованием зондового датчика специальной конструкции. 1 — острие, 2 — чип, 3 — диэлектрический слой, 4 — экран, 5 — компенсационный электрод, 6 — варикап, 7 — балансный усилитель

что и изменения паразитной емкости при сканировании в основном обусловлены изменениями взаимной емкости чипа и образца. Обойти эти трудности позволяет использование зондового датчика специальной конструкции [11]. На чип датчика со стороны иглы наносится проводящий экран, отделенный от собственно чипа слоем диэлектрика толщиной около 50 мкм (рис. 2). Таким образом, мы вместо изменяющейся при сканировании паразитной емкости, образованной чипом и образцом, получили постоянную емкость, образованную чипом и проводящим экраном.

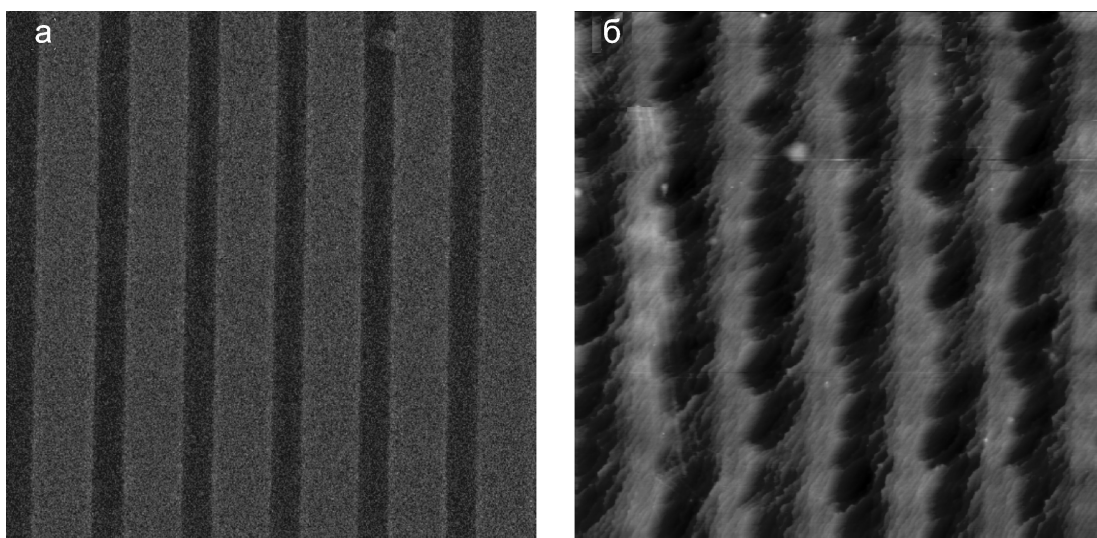
Оставшуюся паразитную емкость между зондовым датчиком и образцом, образованную кантилевером и незранированной частью чипа, предложено компенсировать в два этапа. Первый этап представляет собой электромеханическую компенсацию: над кантилевером и чипом зондового датчика располагается компенсационный электрод, выполненный в форме полукольца (рис. 2). Электрод и зонд соединяются со входами балансного усилителя измерительной головки. Таким образом обеспечивается симметризация паразитных емкостей относительно образца. Второй этап компенсации паразитной емкости представляет собой электрическую компенсацию: один из входов усилителя соединяется через варикап с общей шиной прибора, обеспечивая тем самым симметризацию входной измерительной цепи относительно земли. В результате удается добиться симметрии входов балансного усилителя на уровне 100 аФ.

В качестве зондирующего используется сигнал на частоте 10 МГц амплитудой 0.1–1 В. Отметим, что выбор для компенсационного электрода формы полукольца обеспечивает симметрию входов усилителя измерительной головки для образцов различной геометрии. Выходной сигнал измерительной головки детектируется синхронным детектором. Устройство для реализации описанного метода состоит из юстировочного столика для измерительной головки СЗМ "Интегра" (ЗАО "Нанотехнология МДТ", Москва, Россия), а также вы-

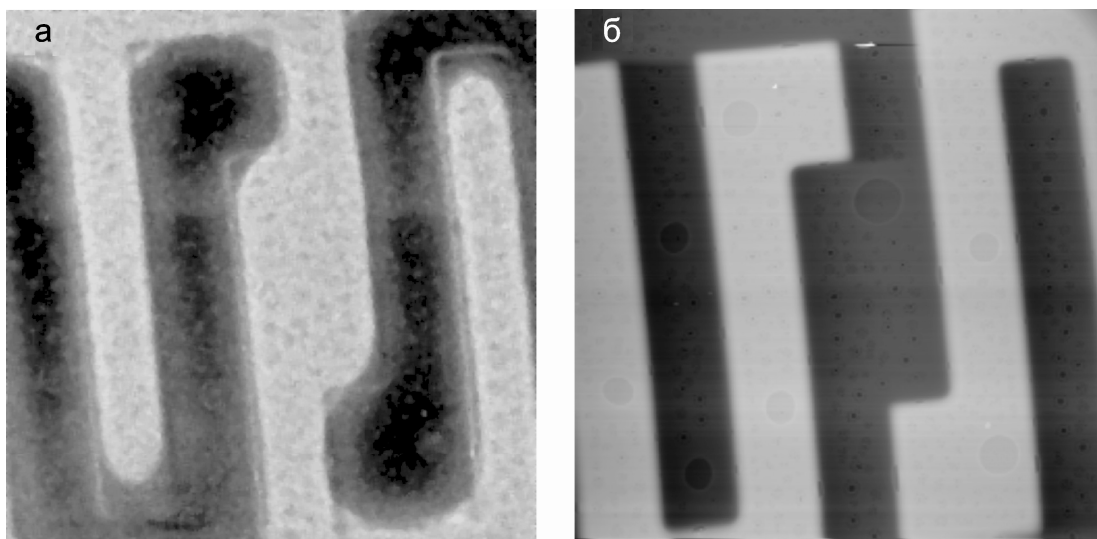
носного блока, в котором расположен синхронный детектор.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

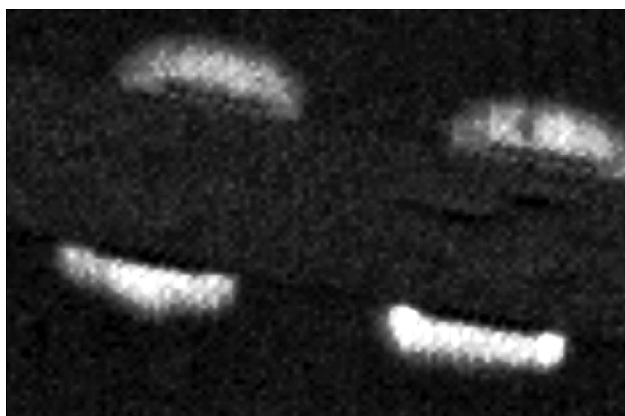
Целью эксперимента являлась проверка работоспособности предложенных метода и устройства, демонстрация эффективности предложенного подхода для устранения влияния изменения паразитной емкости в процессе сканирования, а также оценка шумовых характеристик устройства.



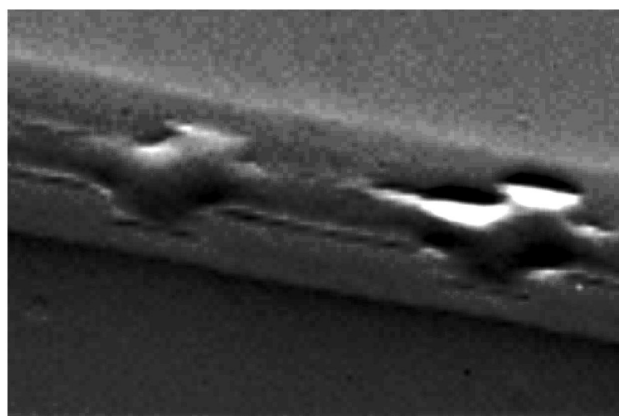
**Рис. 3.** Тестовый образец для КСЕМ.  
а — емкостной контраст  $dC/dV$ ; б — рельеф. Область сканирования  $18 \times 18$  мкм; характерные высоты рельефа 150 нм



**Рис. 4.** Интегральная схема.  
а — емкостной контраст  $dC/dV$ ; б — рельеф. Область сканирования  $40 \times 40$  мкм; характерные высоты рельефа 350 нм



а



б

**Рис. 5.** Тестовый образец для КСЕМ.

а — емкостной контраст  $dC/dV$ ; б — рельеф. Область сканирования  $4.5 \times 3$  мкм

Для испытаний устройства были использованы три образца. Первый образец изготавливается следующим образом. На калибровочной дифракционной решетке Si-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> периодом 3 мкм и высотой 0.3 мкм была проведена имплантация ионов бора (энергия 50 кэВ, доза 50 мкКл/см<sup>2</sup>). Затем было проведено травление окисла с поверхности образца. На рис. 3 представлены полученные на образце сканированные изображения емкостного контраста  $dC/dV$  и рельефа образца. На рис. 4 представлены сканированные изображения поверхности другого образца — интегральной схемы. Подложка имеет р-тип проводимости, выполненные в ней карманы — n-тип. Для изготовления третьего образца (предоставлен National Nano Device Laboratories, Taiwan, Mao-Nan Chang, Ph. D) дифракционная решетка периодом 2.8 мкм, выполненная на кремниевой подложке n-типа с ориентацией (100), легируется ионами BF<sub>2</sub> с энергией 20 кэВ. Доза при имплантации такова, что концентрация примеси в легированных областях решетки составляет порядка  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Затем два скола такой решетки соединяются вместе. На рис. 5 представлены сканированные изображения емкостного контраста и рельефа образца.

Обратим внимание, что исследованные образцы представляют собой большеразмерные планарные структуры с развитым рельефом. Тем не менее на представленных изображениях четко видны границы по-разному легированных областей, и нет нелинейных искажений, вызываемых эффектом изменения паразитной емкости в процессе сканирования при использовании традиционных подходов. Эффективность применения зондового датчика специальной конструкции подтверждается также сравнением величины изменения выходного сигнала устройства при перемещении зонда

по поверхности однородно легированного образца в случаях зондовых датчиков с разным размером незранированной части чипа. Так, при уменьшении размера незранированной части чипа от  $300 \times 1600$  мкм до  $10 \times 1600$  мкм паразитный фон в выходном сигнале уменьшается примерно вдвое, а величина паразитного изменения выходного сигнала при движении зонда по растру микроскопа — приблизительно на порядок.

Для оценки шумовых характеристик измерялся шум выходного сигнала разработанного устройства (среднеквадратичное отклонение от среднего) в полосе 1 кГц, который составляет около 3 мВ. Крутизна преобразования разработанного датчика была оценена экспериментально на уровне  $\sim 10^{-15}$  Ф/В, откуда спектральная плотность шумов датчика может быть оценена значением  $0.1-0.5$  аФ/Гц<sup>-1/2</sup>, в то время как аналогичное значение для системы Veeco составляет  $\sim 5$  аФ/Гц<sup>-1/2</sup>.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, предложены метод и устройство для реализации контактной сканирующей емкостной микроскопии, которые позволяют примерно на порядок уменьшить влияние на получаемые результаты изменения паразитной емкости в процессе сканирования, что дает возможность расширить применимость КСЕМ для исследования пространственного распределения концентрации носителей на большеразмерных образцах с развитым рельефом, в том числе на пластинах стандартных для микроэлектроники размеров. Кроме того, применение предложенного метода компенсации, а также зондового датчика специальной конструкции позволяет при измерении емкости снизить уровень шумов по сравнению с известными подходами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hochwitz T. et al.* Imaging Integrated Circuit Dopant Profiles with the Force-Based Scanning Kelvin Probe Microscope // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1996. V. 14, N 1. P. 440–446.
2. *Shafai C. et al.* Delineation of Semiconductor Doping by Scanning Resistance Microscopy // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 64, N 3. P. 342–345.
3. *Williams C.C., Hough W.P., Rishton S.A.* Scanning Capacitance Microscopy on a 25 nm Scale // *Appl. Phys. Lett.* 1989. V. 55, N 2. P. 203–205.
4. *Nakagiri N. et al.* Application of Scanning Capacitance Microscopy to Semiconductor Devices // *Nanotechnology.* 1997. V. 8. P. A32–A37.
5. *Duhayon N. et al.* Assessing the Performance of Two-Dimensional Dopant Profiling Techniques // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2004. V. 22, N 1. P. 385–393.
6. *Oliver R.A.* Advances in AFM for the Electrical Characterization of Semiconductors // *Rep. Prog. Phys.* 2008. V. 71. P. 076501 (37 p).
7. *Lee D.T., Pelz J.P., Brushan B.* Instrumentation for Direct, Low Frequency Scanning Capacitance Microscopy, and Analysis of Position Dependent Stray Capacitance // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. V. 73, N 10. P. 3525–3533.
8. Патент США № 7023220, 19.10.2004.
9. *Kimura K. et al.* Two-Dimensional Dopant Profiling by Scanning Capacitance Microscopy // *Applied Surface Science.* 2003. V. 210. P. 93–98.
10. *Born A., Wiesendanger R.* Scanning Capacitance Microscopy as a Tool for the Characterization of Integrated Circuits // *Applied Physics A. Materials Science & Processing.* 1998. V. 66. P. S421–S426.
11. Патент РФ № 2289862, 23.12.2004.

*Гос. учреждение высшего профессионального образования "Московский физико-технический институт (государственный университет)"*

Материал поступил в редакцию 14.07.2009.

## APPLICATION OF SCANNING CAPACITANCE MICROSCOPY TO LARGE-SCALE SAMPLES

V. V. Polyakov

*Moscow Institute of Physics and Technology*

In this paper we discuss the application of scanning capacitance microscopy (SCM) for high spatial resolution investigation of dopant concentration in semiconductors on large-scale planar samples with rough topography. SCM method and apparatus allowing to reduce the influence of stray capacitance changes during scanning process more than ten times compared to known techniques are developed. Corresponding experimental results are presented.

*Keywords:* SCM, capacitance microscopy, stray capacitance, AFM, SPM