

К. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ, А. С. КЛИМЕНКО,
А. П. ПОКАНЕВИЧ, Ю. М. ШУСТОВ

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов
E-mail: popovmc@i.kiev.ua, microic@voliacable.com

Дата поступления в редакцию
06.11 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ
(ОНПУ, г. Одесса)

РТУТНЫЙ МИКРОЗОНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

С помощью ртутного микрозонда предложена конструкция исследования локальные электрофизические свойства структур Si-SiO₂ с тонким слоем оксида в области электрически активных дефектов с локальностью 5—25 мкм.

Возрастание степени интеграции изделий микроэлектроники неразрывно связано с неуклонным сокращением геометрических характеристик их активных элементов. В результате размеры активных элементов полупроводниковых приборов становятся соизмеримыми с размерами областей, где проявляется неоднородность электрофизических свойств материалов и технологических структур, и влияние неоднородности на параметры и надежность изделий существенно повышается. Как следствие, растет потребность в разработке методик и измерительных средств, позволяющих достоверно и с необходимым уровнем локальности проводить анализ свойств материалов и структур на различных этапах изготовления приборов. С помощью таких методик можно получать информацию для эффективного управления технологическими процессами изготовления таких важнейших структур как диэлектрик-полупроводник (ДП) и металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) с целью снижения концентрации электрически активных дефектов, понижения уровня флуктуаций электрофизических параметров и повышения качества изделий микроэлектроники.

Одним из распространенных средств при исследовании полупроводниковых материалов (Si, GaAs, SiGe и др.) и ДП-, МДП-структур является ртутный зонд, позволяющий экономично, экспрессно и без нарушения поверхности формировать контакт к исследуемым структурам [1, 2]. При этом контакт большинства широко применяемых полупроводниковых материалов с ртутью образует диод Шоттки, являющийся эффективным средством исследования свойств полупроводников. В настоящее время наибольшее распространение в микроэлектронике нашли ртутные зонды с диаметром контакта 0,1—1 мм. В большинстве случаев площадь контакта имеет фиксированное значение и определяется диаметром цилиндра, по которому ртуть поступает из резервуара снизу вверх и прижимается к исследуемой поверхности под действием вакуума, создаваемого мини-

атурным насосом. Общим недостатком таких зондов является расположение исследуемой полупроводниковой пластины над ртутным контактом и, соответственно, невозможность наблюдения и точного выбора области формирования контакта. Кроме того, и это главное, достаточно большие размеры ртутного контакта позволяют исследовать только интегральные (усредненные) электрофизические параметры структур. В конструкциях зондов, где для уменьшения площади ртутного контакта используются капилляры, также отсутствует возможность наблюдения места контакта, а для поддержания постоянства его площади требуется термостатирование зонда, что усложняет проведение многократных измерений.

Авторами разработана конструкция ртутного зонда, обеспечивающего формирование контакта малого диаметра (5—25 мкм) к визуализируемому участку исследуемой структуры. В сочетании с наиболее информативными методами определения электрофизических параметров и с высокочувствительными средствами их измерения микрозонд позволяет исследовать локальные структурно-примесные неоднородности в структурах ДП на различных полупроводниковых материалах.

Конструкция ртутного микрозонда

При реализации процесса локальных измерений с применением ртутного микрозонда основной целью была визуализация области контактирования, создание контакта малой площади и возможность точного регулирования ее величины под наблюдением.

Предложена следующая конструкция микрозонда. Носителем ртутного контакта является тонкая прозрачная стеклянная пластина прямоугольной или квадратной формы, на нижнюю грань которой нанесен круглый прозрачный электрод (SnO₂ или In₂O₃). Электрод располагается в центре пластины, от него на боковую грань пластины выведена узкая проводящая дорожка для создания контакта с держателем, представляющим собой иглообразный зонд. Последний с помощью токопроводящего клея закрепляется на одной из граней пластины под некоторым углом. Пластины помещают на чистую полированную поверхность полупроводниковой структуры прозрачным электродом вниз, ее держатель фиксируется в гнезде прецизионного микроманипулятора, имеющего три степени свободы и способного поднимать и опускать пластину параллельно поверхности. Развернув пластину

в микроманипуляторе прозрачным электродом вверх, в ее центральной части располагают микрокаплю чистой ртути (диаметром менее 100 мкм), которая за счет эффекта смачивания материала электрода создает контакт с ним. Следует отметить, что в ряде случаев после создания на стеклянной пластине прозрачного круглого электрода в его центре дополнительно наносят полупрозрачный слой золота толщиной 150—300 Å. При контактировании с этим слоем ртутной капли формируется амальгама, за счет которой создается более эффективное сцепление с электродом и повышается надежность микрозонда при многократных измерениях.

После этого поворачивают стеклянную пластину микрокаплей вниз и помещают над столиком с исследуемым образцом под длиннофокусный объектив микроскопа с высоким оптическим разрешением. Регулируя прижим микрокапли ртути к исследуемой поверхности, изменяют диаметр контактной площадки (рис. 1).

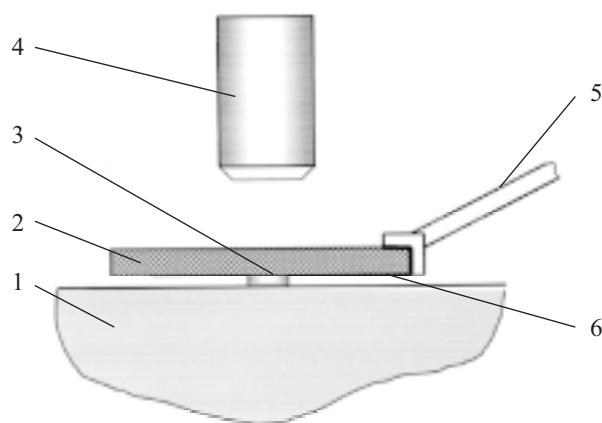


Рис. 1. Конструкция ртутного микрозонда:

1 — полупроводниковая структура; 2 — прозрачная стеклянная пластина; 3 — капля ртути; 4 — длиннофокусный объектив микроскопа; 5 — держатель пластины, установленный в микроманипуляторе; 6 — прозрачный электрод

Помимо описанной конструкции микрозонда на основе стеклянной пластины в форме параллелепипеда была реализована и успешно опробована конструкция микрозонда на основе стеклянного цилиндра диаметром менее 1 мм.

Установлено, что в определенном диапазоне значений диаметра ртутного контакта к прозрачному электроду его площадь, наблюдаемая сверху, практически равна площади контакта ртути к исследуемой поверхности. На основании точных измерений диаметра электрода рассчитывают его площадь. Воспроизводимость площади ртутного контакта при измерениях достигается благодаря применению микроманипуляторов с высокой точностью вертикального перемещения зонда (± 1 мкм) при использовании микроскопа с увеличением в 1000 крат и выше. При диаметре ртутного контакта 10—15 мкм воспроизводимость его площади такова, что разброс ее значений составляет около 10%.

Вывод от держателя зонда в микроманипуляторе соединен с коаксиальным (экранированным) кабелем,

подключенным к измерительному комплексу. Второй коаксиальный кабель измерителя соединяется со столиком, на котором расположен исследуемый образец.

Разработанный ртутный микрозонд был установлен на аналитической зондовой станции MM 7000 фирмы “Micromanipulator” с микроскопом “Micro Zoom II” фирмы “Bausch and Lomb”, имеющим длиннофокусные объективы и максимальное увеличение свыше 1000 крат. Специальный микроманипулятор осуществлял перемещение зонда по трем координатам с точностью ± 1 мкм.

Исследования электрофизических свойств полупроводниковых материалов, ДП- и МДП-структур проводились с помощью автоматизированного комплекса HP4061A фирмы “Hewlett Packard” с минимальным значением измеряемой емкости $1 \cdot 10^{-15}$ Ф.

Образцы и методика исследований

Исследовались структуры Si-SiO₂ с тонкими (50—120 Å) и толстыми (250—270 Å) оксидными пленками, полученными при термическом окислении кремния *n*-типа КЭФ-4,5 и кремния *p*-типа КДБ-10 с удельным сопротивлением 4,5 и 10 Ом·см, соответственно, и концентрацией легирующих примесей $N_D = 1 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В случае исследования структур Si-SiO₂ с толстой оксидной пленкой (порядка 260 Å) формировались алюминиевые электроды в форме квадратов со сторонами 100—250 мкм толщиной 1,2 мкм. Толщина оксида контролировалась на эллипсометре с точностью 5—7 Å.

Определялись высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВЧ ВФХ) структур Hg-SiO₂-Si, сформированных локальным микрозондом на поверхности образцов. Исследования проводились на частоте тестового сигнала 1 МГц. Диаметр ртутного контакта составлял 5—10 мкм. До начала измерений непосредственно перед созданием контакта микрозонда с поверхностью проводилась компенсация распределенной емкости измерительной системы. После формирования контакта измеренные значения высокочастотной емкости корректировались на величину распределенной (паразитной) емкости ртутного микрозонда. Ее величина зависела от прижима ртутной капли (площади контакта) и для исследуемых образцов рассчитывалась на основании измеренных и предварительно рассчитанных ВЧ ВФХ структур Si-SiO₂ с точно известными значениями толщины оксидной пленки и концентрации легирующей примеси в кремнии. При изменении параметров исследуемых структур Si-SiO₂ описанная процедура расчета паразитной емкости для используемой площади контакта повторяется.

В первой серии экспериментов исследовались локальные электрофизические свойства электрически активных дефектов (ЭАД). В целях выявления ЭАД на поверхности кремния в структурах Si-SiO₂ их визуализации и точного определения координат был использован ранее разработанный авторами метод нематических жидких кристаллов (НЖК), позволяющий визуализировать структурно-примесные дефекты на поверхности полупроводника, в области которых происходит локальное изменение поверхностного потенциала [3].

После определения координат ЭАД и их привязки к специально созданным реперным знакам на пластинах НЖК удалялся. После стандартной химической обработки поверхности проводился анализ локальных ВЧ ВФХ структур $\text{Hg-SiO}_2\text{-Si}$ вдоль линий, пересекающих области расположения дефектов. На основании ВЧ ВФХ рассчитывались значения плотности эффективного фиксированного заряда в оксиде кремния N_{SS} . По форме характеристик, в частности по отношению минимальной емкости в области инверсии к емкости оксида, оценивались эффективные значения концентрации легирующей примеси на поверхности N_D .

Во второй серии экспериментов исследовалось влияние термоупругих напряжений, существующих в системах Si-SiO_2 вблизи края электродов структур $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$, на локальные электрофизические свойства оксида и границы раздела «диэлектрик—полупроводник». Эти напряжения возникают вследствие различия термических коэффициентов расширения алюминия и кремния. В этом случае анализировались локальные ВЧ ВФХ при сканировании ртутным микронзондом поверхности оксида кремния перпендикулярно краю алюминиевого электрода. Измерения проводились на расстоянии до 25 мкм от края электрода.

Результаты и обсуждение

Выявленные методом НЖК [3] ЭАД на поверхности кремния в структурах Si-SiO_2 , в основном, имели вид линейных дислокаций и отдельных точечных дефектов, обусловленных, по-видимому, образованием дефектов упаковки при термическом окислении. На краях пластин кремния в ряде случаев наблюдались скопления линейных дислокаций, расположенных под углом 60° друг к другу и имеющих вид линий скольжения. Это свидетельствовало о том, что причиной их появления служили термомеханические напряжения, возникшие на краях пластин в результате высокотемпературных термических про-

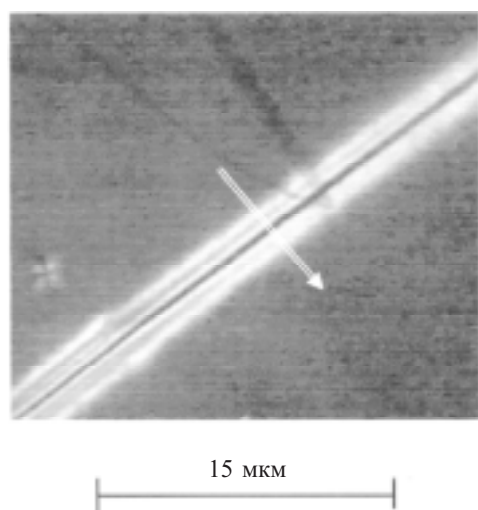


Рис. 2. Визуализация ЭАД на поверхности полупроводника в структуре Si-SiO_2 с толщиной оксидной пленки 117 Å методом нематических жидких кристаллов (стрелкой указана линия анализа локальных электрофизических свойств)

цессов. Один из типичных линейных дефектов, сформировавшихся вблизи края окисленной пластины кремния, представлен на рис. 2. Изображение ЭАД, выявленного методом НЖК, имеет вид полосы, состоящей из центральной темной линии и двух симметрично расположенных светлых полос, которые согласно модели линейной дислокации [4] соответствуют ядру дислокации и окружающим его областям пространственного заряда.

В результате измерения локальных ВЧ ВФХ в области линейных ЭАД и вне дефектов было определено, что на бездефектных участках локальные свойства структур близки к интегральным, измеренным ртутным зондом большого диаметра (500 мкм). Небольшой разброс величины N_{SS} (менее 10%), по-видимому, отражает свойственный данной структуре уровень флуктуаций фиксированного заряда в оксиде. На участках с дефектами ВЧ ВФХ претерпевает определенные изменения. На основании статистического усреднения полученных результатов установлено, что наиболее типичными для этих участков являются характеристики 1 и 2 на рис. 3, которые существенно отличаются от характеристик, свойственных бездефектным областям (кривая 3). Наблюдаются заметные сдвиги ВЧ ВФХ по оси напряжений (до 0,5 В), которые соответствуют локальному увеличению плотности фиксированного заряда на $(7-8) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. При этом также были отмечены и случаи уменьшения N_{SS} и изменения знака заряда. На начальной стадии формирования инверсии наблюдается небольшой подъем на ВЧ ВФХ (кривая 1 на рис. 3). Такое поведение указывает на аномально высокую скорость генерации неосновных носителей заряда вследствие появления инверсионного слоя на поверхности кремния при отрицательных значениях N_{SS} в оксиде на кремнии n -типа. Кроме того, сам дефект может иметь низкое значение локального эффективного генерационного времени жизни неосновных носителей. Зарегистрированы изменения локальных значений уровня N_D в ЭАД. Для дислокации это может быть обусловлено присутствием пространственного заряда вдоль

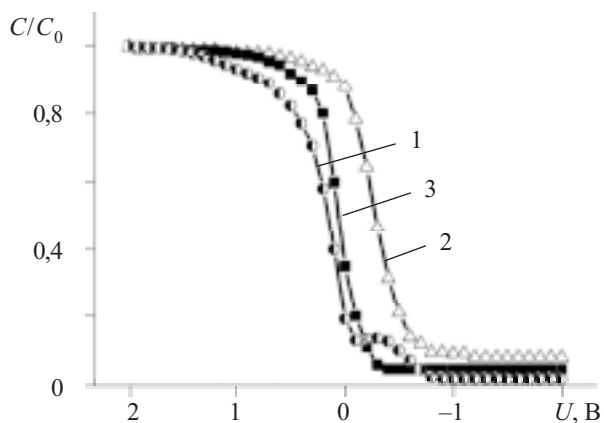


Рис. 3. Локальные нормированные ВЧ ВФХ структур $\text{Hg-SiO}_2\text{-Si}$ на кремнии КЭФ-4,5 со сверхтонким оксидом (толщина SiO_2 — 117 Å) в области ЭАД (1, 2) и вне дефекта (3) ($C_0 = 63 \cdot 10^{-15}$ Ф, диаметр ртутного контакта — 5 мкм)

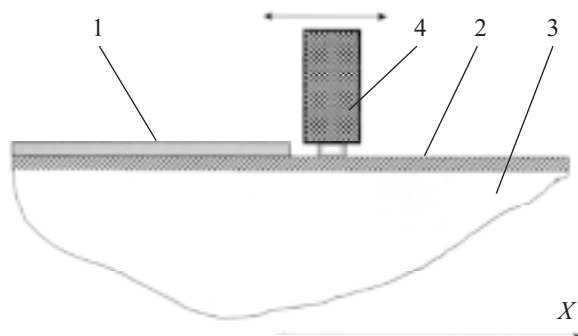


Рис. 4. Схема сканирования МДП-структуры ртутным микрозондом перпендикулярно краю электрода: 1 — электрод; 2 — диэлектрик; 3 — полупроводник; 4 — микрозонд

ее центральной линии. Возможно, что в некоторых случаях имеет место влияние так называемых «примесных атмосфер», образующихся вблизи структурных дефектов в кремнии.

Обращает на себя внимание и форма локальных ВЧ ВФХ на участках слабого обогащения поверхности полупроводника основными носителями (в начале спада кривых, рис. 3). На кривой 3, полученной на бездефектном участке, производная емкости по напряжению dC/dV , служащая качественной мерой неоднородности плотности поверхностного заряда [5], при значениях $C/C_0=0,75$ максимальна и составляет $1,25 \text{ В}^{-1}$. На кривых 1 и 2, характерных для участков с ЭАД, значения производных меньше и равны соответственно $0,65$ и $1,02 \text{ В}^{-1}$. Следовательно, в областях ЭАД в структурах Si-SiO₂ неоднородность плотности поверхностного заряда повышается.

Необходимо учитывать, что поскольку диаметр ртутного контакта превышает размеры ЭАД, реальные изменения величин N_{SS} и N_D в самих дефектах будут еще выше. В рассмотренном случае ширина слоя пространственно заряда вокруг линейной дислокации для кремния с $N_D=1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ составляла приблизительно 2 мкм, в то время как диаметр ртутного контакта равнялся 5 мкм.

Исследования влияния механических напряжений в непосредственной близости к краю электродов МДП-структур на поведение локальных ВЧ ВФХ систем Si-SiO₂ проведены с помощью ртутного микрозонда со средним диаметром контакта порядка 7,5 мкм и шагом перемещения 2,5—3 мкм (рис. 4). Установлено, что по мере приближения к краю алюминиевого электрода происходит сдвиг локальных ВЧ ВФХ в сторону более высоких напряжений инверсии вследствие увеличения плотности фиксированного заряда в оксиде N_{SS} . Изменения наблюдаются начиная с 10 мкм от края и резко увеличиваются по мере приближения к электроду. Наибольшие изменения локальных ВЧ ВФХ и, соответственно, величины N_{SS} зарегистрированы на минимально возможном для измерений расстоянии от центра микрозонда до края электрода, равном 5 мкм (рис. 5). При этом локальные значения N_{SS} возросли на $3,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Поскольку концентратором механических напряжений в МДП-структуре является край электрода, можно предпо-

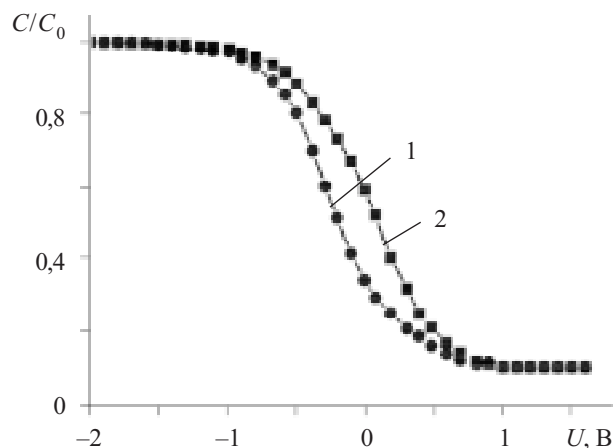


Рис. 5. Локальные нормированные ВЧ ВФХ структуры Hg-SiO₂-Si на кремнии КЭФ-4,5 с толщиной SiO₂ — 259 Å на удалении 10 (1) и 5 мкм (2) от края электрода ($C_0=70,5 \cdot 10^{-15} \text{ Ф}$, диаметр ртутного контакта — 7,5 мкм)

ложить, что в непосредственной близости к краю эти изменения значительно выше. Полученные данные качественно согласуются с известными результатами измерений, выполненных методами рентгеновской топографии [6] и спектроскопии Рамана [7], показывающими характер распределения механических напряжений в полупроводниковых подложках вблизи краев технологических структур.

Таким образом, ртутный микрозонд предложенной конструкции с диаметром контакта 5—25 мкм можно успешно применять для контроля однородности локальных электрофизических свойств технологических структур в изделиях микроэлектроники и для исследования локальных свойств электрически активных дефектов в системах Si-SiO₂ со сверхтонкой пленкой оксида.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Severin P. J., Poodt G. J. Capacitance – voltage measurements with a mercury – silicon diode // J. Electrochem. Soc.— 1972.— Vol. 119.— P. 1384.
2. Binet M. Fast and nondestructive method of C(V) profiling of thin semiconductor layers on an insulating substrate // Electronics Lett.— 1975.— Vol. 11.— P. 580.
3. Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. Imaging and investigation of non-uniform distributions of electrophysical properties of insulator-semiconductor structures with thin oxides // Mater. Science and Engineering.— 2005.— Vol. 118.— P. 170.
4. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках.— М.: Мир, 1974.
5. Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник.— Киев.: Наукова думка, 1978.
6. Доброхотов В. Г., Приходько А. В. Деформации в кремнии, создаваемые несплошными диэлектрическими пленками // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника.— 1990.— № 4 (138).— С. 139.
7. De Wolf I. Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits // Semicond. Sci. Technol.— 1996.— Vol. 11.— P. 139.