

УДК 620.191.4

КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЙ-ДИЭЛЕКТРИК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПО ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Жарин А.Л.¹, Петлицкий А.Н.², Пилипенко В.А.², Турцевич А.С.²,
Тявловский А.К.¹, Тявловский К.Л.¹

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
г. Минск, Республика Беларусь

Рассмотрено применение метода Кельвина–Зисмана (контактной разности потенциалов) для неразрушающего контроля и выявления дефектов структур кремний-диэлектрик. Метод использовался для визуализации распределения электрического потенциала поверхности и изгиба энергетических зон по поверхности термически окисленной кремниевой пластины, легированной бором. Полученная картина распределения дефектов находится в хорошем согласии с данными о влиянии дефектообразующих факторов. Сопоставление результатов визуализации потенциала поверхности с данными, полученными методом эллипсометрии, показало, что наличие и толщина диэлектрического слоя не оказывают влияния на результаты контроля. (E-mail: gusevilm@bntu.by)

Ключевые слова: потенциал поверхности, метод Кельвина–Зисмана, структура кремний-диэлектрик, неразрушающий контроль, дефекты полупроводниковой пластины.

Введение

К качеству и надежности интегральных схем (ИС) предъявляются высокие требования независимо от того, в какой радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) они будут применены: бытовой или профессиональной. Например, при доле дефектности партий ИС в пределах 0,01 % (одна дефектная схема на 10 000), процент отказов печатных плат, на которых смонтировано по 100 ИС, составит 1. А уже при дефектности партий ИС в пределах 1 %, выход годных печатных плат составит 63,4 %, т.е. процент дефектных плат будет равен 36,6 [1]. Расходы на восстановление РЭА при отказе полупроводниковых изделий (ППИ) в эксплуатации выше на порядок, чем расходы на восстановление работоспособности аппаратуры при ее изготовлении [2]. В настоящее время общеприняты два основных направления увеличения надежности выпускаемых партий ППИ:

– устранение причин отказов при изготовлении изделий путем изучения и усовершенствования производственного процесса и по-

вышения контроля, т.е. воздействие на процесс производства посредством обратной связи передачи информации и создания в конечном счете бездефектной технологии;

– выявление и удаление изделий с отказами (действительными и потенциальными) из готовой партии до поставки потребителю.

При этом наиболее эффективным методом повышения качества и надежности выпускаемых изделий является первый метод.

Технология изготовления ИС включает большое число разнообразных операций [3], причем результат проведения каждой из них во влиянии на выходные параметры ИС проявляется не сразу после проведения этой операции даже при наличии контроля параметров технологического процесса и слоев приборных структур. Наиболее распространенные методы межоперационного контроля основаны либо на использовании тестовых структур [4], либо на измерении усредненных по площади пластины физических параметров приборных структур [1]. При этом для выявления причин отказов приборных структур, проявляющихся через не-

заряд Q_{ox} , создающий на диэлектрике падение напряжения U_{ox} . Структура в целом является электронейтральной, что обеспечивается наличием в подповерхностном слое полупроводника равного по величине и противоположного по знаку заряда Q_{SC} , формирующего область пространственного заряда (ОПЗ) толщиной d_{SC} . В пределах ОПЗ имеет место изгиб энергетических зон, величина которого составляет eU_{SC} .

Поверхности полупроводниковой пластины и эталонного образца зонда Кельвина характеризуются значениями работы выхода электрона (РВЭ) φ_S и φ_P соответственно, определяемыми как разность энергий электрона в бесконечности и на поверхности материала. При установлении термодинамического равновесия между полупроводниковой пластиной и эталонным образцом зонда Кельвина происходит выравнивание уровней Ферми, что в методе Кельвина–Зисмана обеспечивается наличием внешней электрической цепи, в которую включен источник компенсирующей ЭДС U_{CPD} . Тогда в состоянии равновесия будет соблюдаться условие:

$$eU_{CPD} + \varphi_S - \varphi_P = 0, \quad (1)$$

откуда:

$$U_{CPD} = \frac{\varphi_P - \varphi_S}{e}. \quad (2)$$

Величина U_{CPD} носит название контактной разности потенциалов (КРП) [6] и характеризует разность потенциалов поверхности полупроводниковой пластины и чувствительного элемента зонда Кельвина. Поскольку последний при практических измерениях принимается за ноль, значение U_{CPD} численно равно потенциалу поверхности полупроводниковой пластины. Из (2) следует, что знак КРП (и, соответственно, потенциала поверхности) противоположен знаку РВЭ с поверхности полупроводниковой пластины, а численное значение измеряемого потенциала поверхности зависит от значения РВЭ с поверхности эталонного образца зонда Кельвина. Величина φ_P , как правило, неизвестна и может изменяться под влиянием факторов окружающей среды, главным образом, вследствие адсорбции различных веществ на поверхности эталонного образца. Такие изменения являются сравнительно медленными, и при измерениях потенциала поверхности различных участков полупроводниковой пластины в сканирующем режиме значение φ_P

в течение одного сеанса измерений может считаться константой. В этом случае разность измеренных значений потенциала поверхности двух участков полупроводниковой пластины составит:

$$\Delta U_{CPD} = U_{CPD1} - U_{CPD2} = \frac{\varphi_P - \varphi_{S1}}{e} - \frac{\varphi_P - \varphi_{S2}}{e} = \frac{\varphi_{S2} - \varphi_{S1}}{e}. \quad (3)$$

Таким образом, изменения измеренных значений потенциала по поверхности полупроводниковой пластины отражают (с обратным знаком) изменения РВЭ с поверхности, что позволяет использовать измерения потенциала поверхности методом Кельвина–Зисмана в сканирующем режиме для выявления дефектов полупроводниковой структуры.

Дополнительную информацию о полупроводниковой структуре можно получить, оказав на полупроводниковую пластину внешнее воздействие для контролируемого изменения структуры энергетических уровней. Как неоднократно указывалось в литературе [7], интенсивное освещение поверхности полупроводника светом с энергией квантов более ширины запрещенной зоны приводит к спрямлению энергетических зон вблизи поверхности. Таким образом, как видно из рисунка 1, величину изгиба энергетических зон eU_{SC} можно определить, измерив потенциал поверхности U_{CPD} в темноте (при наличии изгиба зон) и при интенсивном освещении (в условиях спрямленных зон):

$$eU_{SC} = e(U_{CPD}^{dark} - U_{CPD}^{light}). \quad (4)$$

В ходе эксперимента выполнялось измерение пространственного распределения обеих упомянутых величин – потенциала поверхности U_{CPD} и изгиба энергетических зон eU_{SC} . Важным преимуществом метода Кельвина–Зисмана является неразрушающий бесконтактный характер исследований, что позволяет возвращать исследуемые пластины обратно в технологический процесс и, следовательно, выполнять межоперационный контроль полупроводниковых структур на любом этапе технологического процесса, а также применять другие (альтернативные) методы контроля после характеристики полупроводниковой пластины по методу Кельвина–Зисмана.

Результаты исследований

Объектом исследования являлась кремниевая пластина со структурой «кремний-диэлектрик» диаметром 200 мм, легированная бором до концентрации 1×10^{15} ат/см³. Слой оксида кремния толщиной 7 нм создавался термическим окислением при температуре 950 °С в течение 10 мин в атмосфере сухого кислорода. Перед проведением исследований локальный участок задней поверхности пластины подвергался травлению плавиковой кислотой для удаления окисного слоя и обеспечения омического контакта с держателем.

Сканирование поверхности образца осуществлялось по прямоугольной координатной сетке. Для сокращения времени сканирования, с учетом ожидаемого размера подлежащих выявлению неоднородностей, разрешающая способность измерительной установки была выбрана 2,5 мм по обеим координатам. Результаты скани-

рования выводились в виде двумерных цветных карт распределения потенциала поверхности и изгиба энергетических зон. Для большей наглядности на картах наносились линии уровня. Пространственное распределение потенциала поверхности пластины показано на рисунке 2. Результаты измерений пространственного распределения изгиба энергетических зон приведены на рисунке 3.

Для оценки влияния толщины диэлектрического слоя на результаты измерения потенциала поверхности и изгиба энергетических зон были выполнены измерения толщины диэлектрика по поверхности пластины, для чего использовался метод эллипсометрии. Результат визуализации пространственного распределения толщины диэлектрика (оксида кремния) по поверхности пластины показан рисунке 4.

Более наглядно распределение дефектов прослеживается на карте распределения изгиба энергетических зон (рисунок 3).

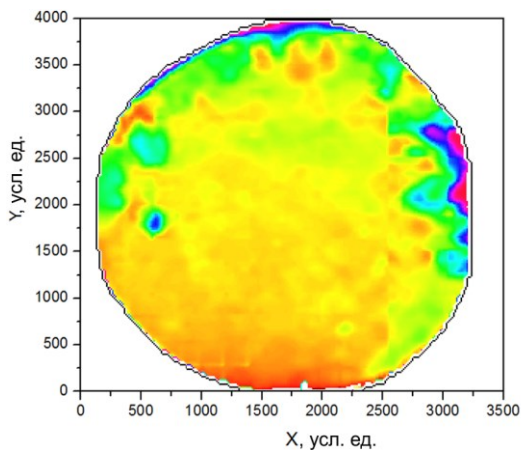


Рисунок 2 – Распределение потенциала поверхности полупроводниковой пластины

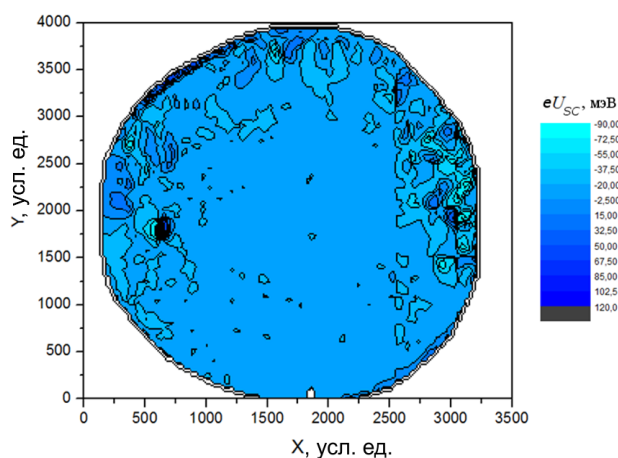
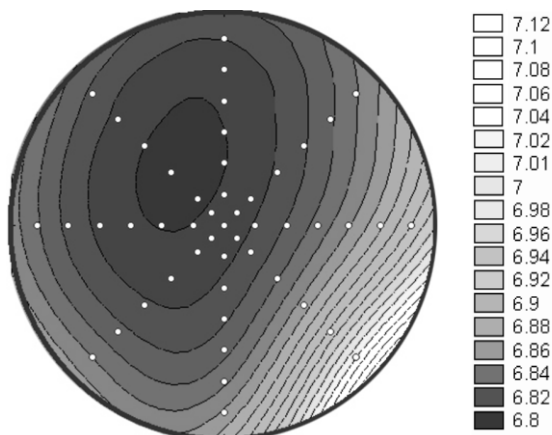


Рисунок 3 – Распределение изгиба энергетических зон полупроводниковой пластины



Базовый срез

Рисунок 4 – Распределение толщины диэлектрика (в мкм) по данным эллипсометрии

На большей части поверхности пластины изгиб энергетических зон составляет одну и ту же величину – около минус 18 мэВ, без какой-либо корреляции с толщиной диэлектрика (что хорошо согласуется с теоретическими выкладками, согласно которым само по себе наличие диэлектрика не меняет структуры энергетических уровней проводников и полупроводников). Таким образом, без использования дополнительного воздействия (например, воздействия коронным разрядом [8]), используемый метод Кельвина–Зисмана позволяет характеризовать поверхность полупроводника под диэлектриком, но не дает информации о диэлектрике. По краям образца, в особенности в его правой части, наблюдаются значительные скопления дефектов двух типов: со значениями изгиба энергетических зон порядка минус 70 мэВ и порядка плюс 15 мэВ.

Для количественной характеристики полученных распределений потенциала поверхности и изгиба энергетических зон удобно воспользоваться гистограммами распределения результатов измерений.

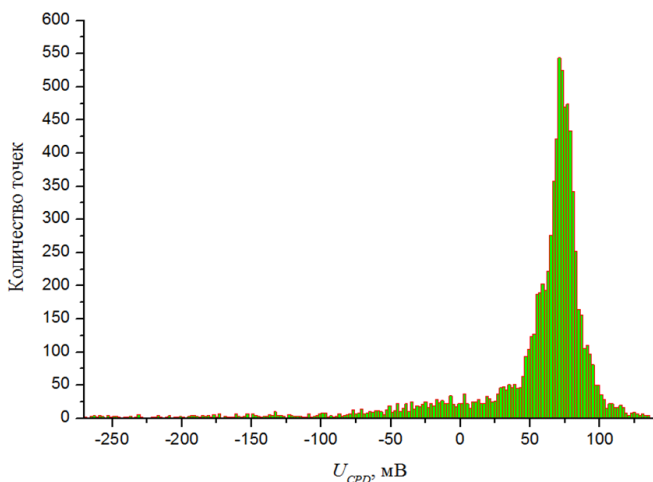


Рисунок 5 – Гистограмма распределения результатов измерений потенциала поверхности

Гистограмма распределения значений потенциала поверхности (рисунок 2) приведена на рисунке 5.

Распределение одномодальное, закон распределения близок к нормальному. Центр распределения составляет $U_{CPDmean} = 70$ мВ, полуширина гистограммы равна 40 мВ. Значительный левый «хвост» распределения определяется дефектами на краях пластины, дающими большое отличие значений потенциала поверхности.

Гистограмма распределения значений изгиба энергетических зон (рисунок 3) приведена на рисунке 6. Распределение одномодальное, закон распределения близок к Гауссову распределению. Центр распределения составляет $eU_{SCmean} = -18$ мэВ, полуширина гистограммы равна 10 мэВ. Параметры распределения результатов измерений по площади пластины свидетельствуют о качестве проведения технологической операции и параметрах формируемых приборных слоев и могут использоваться как количественная характеристика качества полупроводниковой пластины.

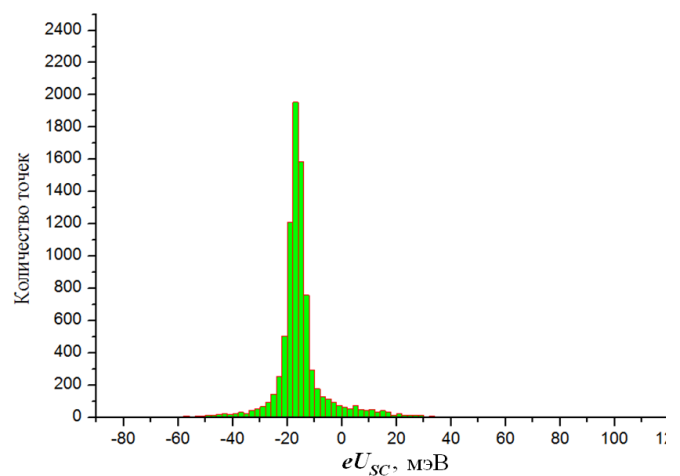


Рисунок 6 – Гистограмма распределения результатов измерений изгиба энергетических зон

Заключение

1. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность выявления и локализации термостимулированных дефектов поверхности полупроводниковой пластины со структурой кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала поверхности. При этом измеренные по методу Кельвина–Зисмана абсолютные значения потенциала поверхности не могут быть

однозначно интерпретированы вследствие неопределенности и нестабильности работы выхода электрона с поверхности чувствительного элемента зонда Кельвина. В то же время известно, что значения работы выхода электрона существенно изменяются в окрестности дефектов поверхности [5]. Таким образом, относительные изменения потенциала по поверхности полупроводниковой пластины отражают распределение дефектов, что позволяет выявлять и определять локализацию последних. Получен-

ная визуализированная картина распределения дефектов находится в хорошем согласии с данными о том, что края кремниевых пластин подвержены более сильному воздействию дефектообразующих факторов, что позволяет говорить о пригодности предложенной методики для выявления дефектов термообработки.

2. Наличие и толщина диэлектрического слоя не оказывают влияния на результаты измерений потенциала поверхности по методу Кельвина–Зисмана, что подтверждает возможность контроля полупроводниковых материалов под диэлектрическими покрытиями без нарушения последних. В качестве количественной характеристики качества полупроводниковой пластины может использоваться полуширина гистограммы распределения значений потенциала поверхности, при этом определение критериев годности пластины по данному параметру требует дополнительных исследований.

3. Для уточнения физической природы дефектов может использоваться дополнительное воздействие на полупроводниковую структуру интенсивным оптическим излучением, совмещенное с измерением потенциала поверхности, что позволяет определить величину изгиба энергетических зон в данной точке пластины. Поскольку последняя связана с наличием встроенного заряда в диэлектрике, анализ пространственного распределения изгиба энергетических зон позволяет определить распределение встроенного заряда в диэлектрике полупроводниковой структуры.

Список использованных источников

1. Емельянов, В.А. Системы качества в микроэлектронике / В.А. Емельянов. – Минск : Бел. наука, 1997. – 143 с.
2. Горлов, М.И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Емельянов, Д. Л. Ануфриев. – Минск : Бел. наука, 2006. – 367 с.
3. Коледов, Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л.А. Коледов. – СПб. : Лань, 2009. – 400 с.
4. Белоус, А.И. Тестовые структуры в системах управления качеством интегральных микросхем / А.И. Белоус, А.В. Емельянов, Г.Г. Чигирь. – Минск : Интегралполиграф. 2008. – 208 с.
5. Shroeder, D.K. Contactless surface charge semiconductor characterization / D.K. Shroeder // Materials Science and Engineering. – 2002. – № 91–92. – P. 196–210.
6. Zisman, W.A. A new method of measuring contact potential differences in metals / W.A. Zisman // Review Of Scientific Instruments. – 1932. – V. 3. – P. 367.
7. Kronik, L. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications / L. Kronik, Y. Shapira // Surface Science Reports. – 1999. – V. 37. – P. 1–206.
8. Wilson, M.S. New COCOS (Corona Oxide Characterization of Semiconductor) Method for Monitoring the Reliability of Thin Gate Oxides / M.S. Wilson [et al.] // Electrochemical Society Proceedings. – 1999. – V. 99–16. – P. 373–384.

Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A.L., Petlitsky A.N., Pilipenko V.A., Turtsevitch A.S., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L.

Study of silicon-insulator structure defects based on analysis of a spatial distribution of a semiconductor wafers' surface potential

The matter of the study is application of contact potential difference and band bending visualization technique based on Kelvin–Ziesman technique to the non-destructive testing and defects study of a silicon-insulator structure. Experiments were held using a thermally oxidized boron-doped silicon wafer. Visualized defect distribution map is in a good agreement with a preliminary data on defect-producing factors. Results compared to ellipsometry data show that CPD visualization data is not influenced by presence and thickness of insulating layer. (E-mail: gusevln@bntu.by)

Key words: surface potential, Kelvin–Ziesman technique, silicon-insulator structure, non-destructive testing, semiconductor wafer defects.

Поступила в редакцию 21.10.2013.