

УДК 621.382

**АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА
МОП-СТРУКТУР ПО ВОЛЬТ-ФАРАДНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.¹, Филипня В.А.², Шведов С.В.²,
Черный В.В.³, Явид В.Ю.¹, Янковский Ю.Н.¹

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

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

³Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

e-mail: prosolovich@bsu.by

Исследованы МОП-транзисторы методом вольт-фарадных характеристик, изготовленных в разное время, но по аналогичным технологическим маршрутам и при использовании идентичных технологических материалов. Установлено, что измерения вольт-фарадных характеристик МОП-структур позволяют проводить диагностику качества подзатворного диэлектрика. Вид и форма измеренных характеристик определяются величиной дополнительного положительного заряда в объеме диэлектрика и плотностью быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂, которые коррелируют с поверхностной концентрацией технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов, что позволяет сделать заключение о качестве используемых материалов и соблюдении технологических режимов.

Ключевые слова: вольт-фарадные характеристики, МОП-транзистор, технологические примеси.

Введение

В процессе производства КМОП-структур необходимо проведение большого количества различных технологических операций, в особенности при использовании МДП-технологии. В данном случае весьма важным является выбор химических реактивов и назначение такой последовательности технологических, особенно высокотемпературных, операций, которые в максимально возможной степени снижали бы попадание неконтролируемых (технологических) примесей (ТП) при формировании структуры. Повышенная концентрация ТП обуславливает значительное ухудшение эксплуатационных характеристик создаваемых приборов и снижение процента выхода годных кристаллов.

Ранее было показано [1], что электрофизические характеристики МОП-транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика. Предполагалось, что увеличение порогового напряжения и токов утечки затвора, а также снижение тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и

в области насыщения, проводимости структуры в линейной области обусловлены наличием дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Сделан вывод, что наиболее вероятной причиной ухудшения электрофизических параметров МОП-транзисторов является загрязнение материала технологическими примесями (такими, как Fe, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Cu, Zn и др.) во время производственного процесса изготовления приборов. Для экспериментального подтверждения этих предположений было проведено исследование МОП-структур методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) в зависимости от содержания технологических примесей на поверхности пластин кремния.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В работе исследованы МОП-транзисторы, изготовленные в разное время (приборы серии В изготавливались при применении технологической оснастки непосредственно после ее замены

на «свежую», приборы серии *A* – в конце регламентированного срока использования технологической оснастки) по аналогичным технологическим маршрутам с использованием идентичных технологических материалов. Измерения ВФХ проводились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500 A* и зондовой станции *Cascade Summit 11000*. На пластинах кремния *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 10 Ом·см создавались карманы МОП-транзисторов (70 × 70 мкм) ионным легированием бором для *p*-кармана, фосфором и мышьяком для *n*-кармана. Поликремниевый затвор транзистора, легированный до вырождения, имел размеры 10 × 10 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика (SiO₂) составляла 8 нм. Измерения ВФХ проводились на частоте $f = 1,0$ МГц, с разверткой по напряжению от – 5 до + 3 В, с шагом 50 мВ для тестов на *p*-кармане, для тестов на *n*-кармане – при напряжении ± 3 В с тем же шагом. Концентрация металлических примесей на поверхности пластин определялась методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке *Rigaku TXRF 3750* [2, 3].

Вольт-фарадные характеристики МОП-структур представлены на рисунке 1. Следует отметить, что для приборов серии *A* в случае измерений на *n*-кармане наблюдается сдвиг характеристик вдоль оси напряжений в сторону более отрицательных значений по сравнению с измерениями для приборов серии *B*. Данный факт свидетельствует о наличии в диэлектрике для приборов серии *A* дополнительного положительного эффективного неподвижного заряда, электронные уровни которого располагаются в объеме диэлектрика и не могут быть перезаряжены в течение эксперимента вследствие малой электронной проводимости диэлектрика. Кроме того, на кривых для приборов как серии *A*, так и серии *B* на ВФХ наблюдается пик, характерный для низкочастотных ВФХ. Это обусловлено тем, что поверхностные состояния, расположенные вблизи середины запрещенной зоны имеют времена релаксации ~ 1,0–10 мкс, а поверхностные состояния, находящиеся вблизи разрешенных зон (зона проводимости и валентная зона) – 0,01–1,0 мкс, и частотная зависимость ВФХ для них смещается в область более высоких частот.

Различие в наклонах кривых обеих серий приборов обусловлено различиями в емкости и напряжении плоских зон (определяемых при экстраполяции на ось напряжений наклонов

экспериментальных кривых), которые имели соответственно значения 21,08 пФ и 0,213 В для приборов серии *A*, 19,72 пФ и 0,174 В – для приборов серии *B*.

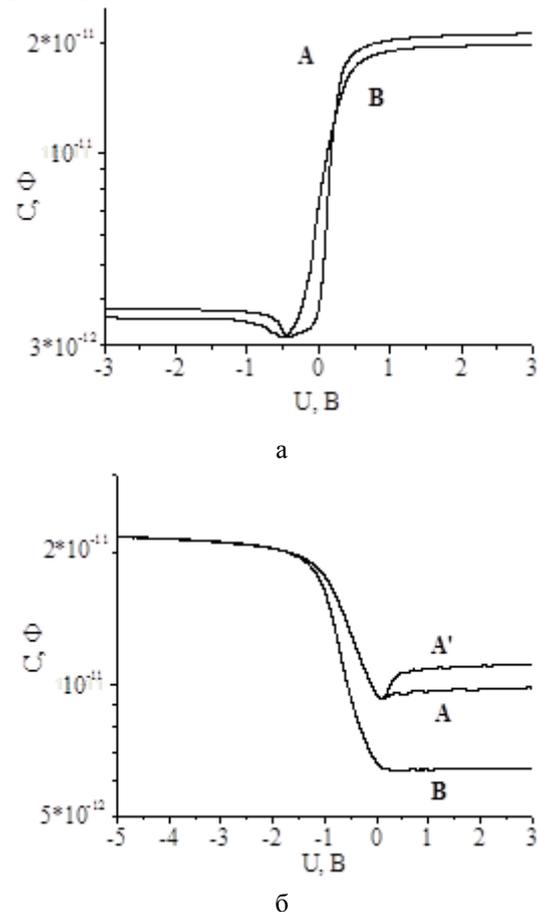


Рисунок 1 – Вольт-фарадные характеристики МОП-транзисторов, измеренные на *n*-кармане (а) и на *p*-кармане (б)

Емкость и напряжение плоских зон при измерениях на *p*-кармане приборов серии *A* имеют соответственно значения 21,72 пФ и – 1,220 В, для приборов серии *B* – 21,78 пФ и – 1,050 В. Существенного смещения кривых ВФХ по оси напряжений при данном режиме измерений не наблюдалось (рисунок 1б). Сдвиг относительно теоретической кривой для обоих видов приборов был примерно одинаковым, что свидетельствует о примерном равенстве величин неподвижного дополнительного заряда в диэлектрике. Различия в наклонах кривых для приборов различных серий обусловлено, как и в случае исследований на *n*-кармане, различием в плотности быстрых поверхностных состояний. Наибольшее несоответствие для ВФХ, измеренных на *p*-кармане (рисунок 1б), между приборами обеих серий наблюдается в области инверсии, в

области обогащения кривые практически совпадают. Это позволяет сделать заключение о том, что разница в плотности быстрых поверхностных состояний наибольшая для центров, имеющих энергетические уровни в верхней половине запрещенной зоны. Из того, что поверхностные состояния лежат вверху запрещенной зоны и имеют донорный характер, следует, что они нейтральны, когда заполнены электронами, и заряжены, когда пусты. Кроме того, для ряда МОП-структур при измерениях на *p*-кармане приборов серии *A* на ВФХ наблюдается пик, характерный для низкочастотных измерений (рисунок 1б, кривая *A'*). Это свидетельствует о том, что у приборов данной серии, в отличие от приборов серии *B*, наблюдаются быстрые поверхностные состояния со временами релаксации менее 1 мкс, вследствие чего генерация неосновных носителей и заполнение поверхностных состояний не успевают следовать за изменениями внешнего напряжения.

Следует отметить, что наличие пика на кривых ВФХ наблюдалось не для всех приборов серии *A* (рисунок 1б, кривые *A* и *A'*), эксперименты проводились более чем по 20 точкам на пластине), что свидетельствует о неоднородном распределении быстрых поверхностных состояний по поверхности пластины.

Учитывая, что данные состояния могут быть связаны с присутствием в окисле ионов щелочных (Na^+ , K^+ , Li^+) и тяжелых металлов, а также ионов H_3O^+ , адсорбированных на поверхности ионов, кислородных вакансий, ловушек в окисле, попадающих в окисел из окружающей среды полярных молекул и материалов, используемых в технологическом процессе, было проведено исследование распределения по поверхности пластин различных технологических примесей. Топограммы распределения технологических примесей по поверхности пластин, на которых были изготовлены приборы серии *A*, показаны на рисунке 2. Наблюдаются локальные области, содержащие Cl ($1,2 \cdot 10^{12}$ ат/см²), K ($1,6 \cdot 10^{11}$ ат/см²), Ca ($7,4 \cdot 10^{10}$ ат/см²), а также локальные области Ti, Cr, Cu, Zn и других примесей. Вся поверхность пластины покрыта слоем Fe со средней концентрацией $\sim 2,0 \cdot 10^{11}$ ат/см², причем по поверхности пластины данная примесь распределена существенно неравномерно. Типичные распределения ТП железа по пластине показаны на рисунке 3. Следует отметить, что данная ТП оказывает весьма негативное влияние на напряжение пробоя подзатворного

диоксида кремния толщиной 3–10 нм. Так, при концентрации железа в объеме более $5 \cdot 10^{11}$ ат/см³ происходит резкое уменьшение напряженности поля пробоя подзатворного диоксида кремния [4]. На топограммах пластин, на которых были изготовлены приборы серии *B*, наблюдаются только пятна Cl по периферии пластины. Содержание всех остальных примесей было ниже предела обнаружения (для Fe < $4,0 \cdot 10^9$ ат/см²).

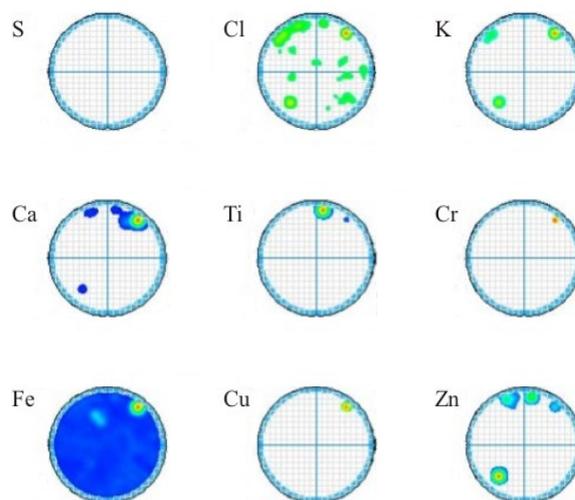


Рисунок 2 – Распределение технологических примесей по поверхности исходных кремниевых пластин, на которых были изготовлены приборы серии *A*

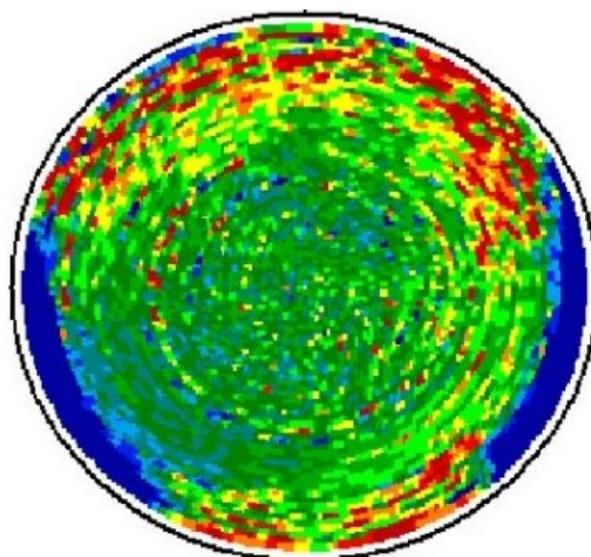


Рисунок 3 – Распределение концентрации железа по площади пластины для приборов серии *A*. Наиболее темный цвет соответствует максимальной концентрации железа

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что дополнительный неконтролируемый заряд, локализованный в области затвора МОП-транзистора, в значительной мере обусловлен присутствием неконтролируемых примесей, концентрация которых превышает минимально допустимые величины, попадающих в полупроводниковую структуру в процессе проведения технологических операций или повышенным содержанием ТП в исходном полупроводниковом монокристалле. При термическом окислении кремния и других высокотемпературных технологических операциях, используемых при изготовлении приборов, многие неконтролируемые примеси, адсорбированные на его поверхности, частично десорбируются, а частично переходят в систему кремний–диоксид кремния, изменяя ее электрофизические свойства. При этом в слое диэлектрика образуется дополнительный положительный заряд, а на границе раздела Si/SiO₂ возрастает плотность быстрых поверхностных состояний, которые распределены по поверхности пластины неравномерно. Их плотность коррелирует с поверхностной концентрацией технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов. Количество частиц, захваченных при данной температуре, определяется их физико-химическими свойствами и концентрацией на исходной поверхности. Увеличение числа адсорбированных частиц приводит, как правило, к возрастанию их концентрации в окисленных образцах и, как следствие, к изменению энергетической плотности быстрых поверхностных состояний, величины постоянного заряда в оксиде, заряда на ловушках в слое диэлектрика и заряда подвижных ионов.

Энергетическая плотность быстрых поверхностных состояний, которые расположены непосредственно на границе Si-SiO₂, сильно зависит от режима получения окисла. Величина постоянного заряда в оксиде зависит от режима окисления, условий отжига и вида предокислительных обработок кремниевых пластин и загрязнения системы Si-SiO₂ катионными примесями. Заряд на ловушках в слое оксида представляет собой объемный заряд, захваченный на энергетические уровни дефектов в SiO₂. Этот тип заряда ассоциируется с медленными поверхностными состояниями. Заряд подвиж-

ных ионов связан с присутствием в оксиде ионов щелочных металлов (Na⁺, K⁺, Li⁺) и ионов тяжелых металлов, попадающих в оксид из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе.

Заключение

Установлено, что измерения вольт-фарадных характеристик МОП-структур позволяют проводить диагностику качества подзатворного диэлектрика. Вид и форма измеренных характеристик определяются величиной дополнительного положительного заряда в объеме диэлектрика и плотностью быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Данные значения коррелируют с поверхностной концентрацией технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов.

Анализ вольт-фарадных характеристик МОП-структур является альтернативным методом контроля чистоты проведения технологических процессов изготовления интегральных микросхем. Для его проведения требуется относительно дешевое, по сравнению с рентгенофлуоресцентным методом полного внешнего отражения, оборудование для измерения электрических характеристик полупроводниковых приборов. При этом контролируется непосредственное влияние примесей на характеристики приборов. Результаты контроля позволяют своевременно корректировать условия проведения технологических операций.

Список использованных источников

1. *Оджаев, В.Б.* Влияние технологических примесей на электрофизические параметры МОП-транзистора / В.Б. Оджаев [и др.] // Вестн. НАНБ Сер. физ.-тех. наук. – 2014. – № 4. – С. 14–17.
2. SEMI M33-0988.
3. *Berneike, W.* Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // Fresenius'Z. Anal. Chem. – 1989. – Vol. 333. – P. 524–526.
4. *Choi, B.D.* Degradation of ultrathin oxides by iron contamination / B.D. Choi, D.K. Schroder // Applied physics letters. – 2001. – Vol. 79, no 16. – P. 2645–2647.

**QUALITY ANALYSIS OF THE GATE DIELECTRIC OF THE MOS-STRUCTURES
BY CAPACITY-VOLTAGE CHARACTERISTICS**

Odzhaev V.B.¹, Pyatlitski A.N.², Prosolovich V.S.¹, Filipenya V.A.², Shvedau S.V.², Chernyi V.V.³, Yavid V.Yu.¹, Yankouski Yu.N.¹

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, Minsk, Belarus

³Belarusian National Technical University

e-mail: prosolovich@bsu.by

Abstract. There were investigated the capacity-voltage characteristics of the MOS transistors, fabricated by the similar process charts, with the identical applied technological materials), however at various time (appropriately further in the text series A and series B). It was shown, that the measurements of the capacity-voltage characteristics of the MOS structures make it possible to perform the quality diagnostics of the gate dielectric. The kind and shape of the measured characteristics are determined by the value of the additional positive charge in the dielectrics and density of the fast surface states on the Si-SiO₂ interface, which correlate with the surface concentration of the technological impurities, adsorbed on the surface of the wafers in process of the devices fabrication, which makes it possible to make a conclusion about the quality of the applied materials and compliance of the manufacturing process.

Keywords: capacity-voltage, MOS-transistor, technological admixtures.

References

1. Odzhaev V.B., Pyatlitski A.N., Prosalovich V.S., Turtsevich A.S., Shvedau S.V., Filipenia V.A., Chorny V.V., Yavid V.Yu., Yankouski Yu.N., Dubrouski V.A. [Influence of technological impurities on electrical parameters of mos transistor]. *Vestci NANB Ser. fis.-tekh. navuk*, 2014, no 4, pp.14–17. (in Russian).
2. SEMI M33-0988.
3. Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U., Fresenius Z. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis. *Fresenius 'Z. Anal. Chem.*, 1989, vol. 333, pp. 524–526.
4. Choi B.D., Schroder D.K. Degradation of ultrathin oxides by iron contamination. *Applied physics letters*, 2001, vol. 79, no 16, pp. 2645–2647.

Поступила в редакцию 17.02.2015.