

УДК 621.382

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОП-ТРАНЗИСТОРА

© 2021 г. В. Б. Оджаев^а, А. Н. Петлицкий^б, В. С. Просолович^{а, *},
В. А. Филипена^б, В. Ю. Явид^а, Ю. Н. Янковский^б

^аБелорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030 Республика Беларусь

^бОткрытое акционерное общество “ИНТЕГРАЛ”-управляющая компания холдинга “ИНТЕГРАЛ”,
ул. Казинца И.П., 121А, Минск, 220108 Республика Беларусь

*E-mail: prosolovich@bsu.by

Поступила в редакцию 08.05.2020 г.

После доработки 14.05.2020 г.

Принята к публикации 02.07.2020 г.

Установлено, что электрофизические характеристики МОП-транзисторов существенным образом зависят от качества подзатворного диэлектрика. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела SiO₂/Si приводит как к увеличению порогового напряжения, так и к снижению тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и в области насыщения, проводимости структуры в линейной области. Возрастают также токи утечки затвора. Показано, что вид и форма вольт-фарадных характеристик определяются величиной дополнительного положительного заряда в объеме диэлектрика и плотностью быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Данные значения коррелируют с профилем распределения поверхностной концентрации технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов, что позволяет сделать заключение о качестве используемых материалов, соблюдении технологических режимов, а также, при необходимости, производить их своевременную соответствующую корректировку.

Ключевые слова: МОП-транзистор, диэлектрик, поверхностные состояния, ток утечки, граница раздела

DOI: 10.31857/S0544126920060083

ВВЕДЕНИЕ

При производстве КМОП-структур требуется большое число технологических операций, особенно при использовании МДП-технологии [1–3]. Производственный контроль качества является составной частью типового технологического процесса и сводится к определению двух составляющих: явных дефектов, характеризующих процент выхода годных приборов, и скрытых дефектов, снижающих их надежность. Целью производственного контроля является не только получение требуемого качества приборов, но и своевременная отбраковка дефектных изделий на различных этапах производства приборов.

Весьма важным является выбор химических реактивов и назначение такой последовательности различных технологических, особенно высокотемпературных, операций, которые в максимально возможной степени исключали бы попадание в полупроводниковую структуру неконтролируемых (технологических) примесей. Изменения параметров техпроцесса, которые происходят с уменьшением проектных норм транзистора, не должны снижать процент выхода годных приборов.

В связи с вышесказанным актуальным является выявление причин лабильной воспроизводимости основных характеристик МОП-транзисторов с целью установления факторов, определяющих надежность и стабильность эксплуатационных параметров интегральных микросхем. Одной из причин ухудшения электрофизических параметров МОП-транзисторов является загрязнение кремниевой подложки технологическими примесями во время производственного процесса. Для проверки этих предположений были проведены исследования МОП-структур с помощью метода вольт-амперных (ВАХ) и высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ), а также измерения концентрации технологических примесей как на поверхности пластин кремния, так и в объеме.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На измерителе параметров полупроводниковых приборов *Agilent B1500A* с применением зондовой станции *Cascide Summit11000* проводились измерения ВАХ и ВФХ двух серий (далее по тексту серия *A* и *B*) *n*-канальных МОП-транзисторов, изготовленных по аналогичным технологи-

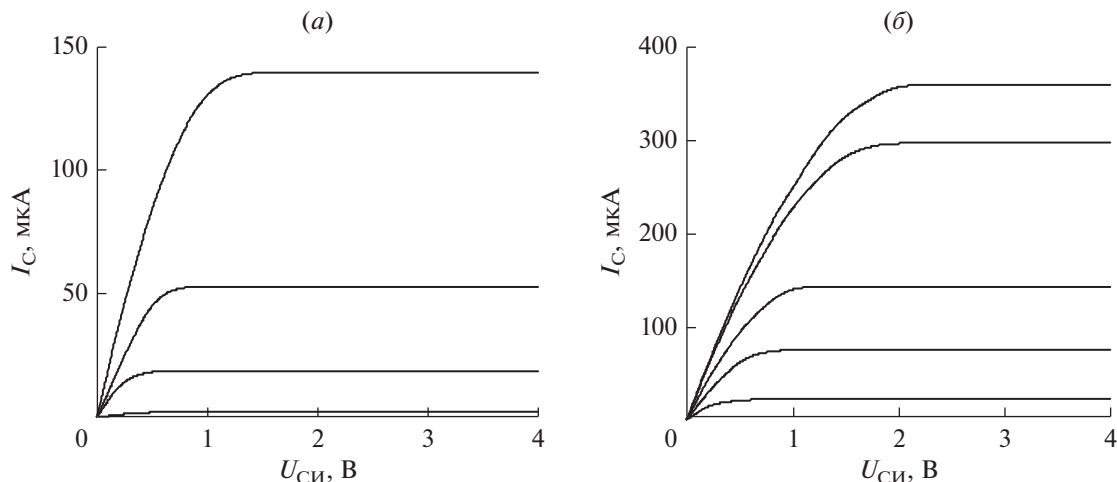


Рис. 1. Выходные характеристики МОП-структур с каналом n -типа серии A (а) и B (б) при $U_3 = 0-6$ В, шаг 1 В.

ческим маршрутам, при идентичных используемых технологических материалах, но в разное время. Карманы МОП-транзисторов размером 70×70 мкм создавались на пластинах кремния p -типа проводимости с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ионным легированием бором (BF_2) для p -кармана, фосфором и мышьяком для n -кармана. Размеры поликремниевого затвора транзистора, легированного до вырождения, составляли 10×10 мкм. Толщина подзатворного диэлектрика (SiO_2) – 7 нм. Измерения ВФХ проводились на частоте $f = 1.0$ МГц с разверткой по напряжению (U) от -5 до $+3$ В с шагом 50 мВ для тестов на p -кармане, при напряжении ± 3 В с тем же шагом для тестов на n -кармане. Содержание металлических примесей на поверхности пластин исследовалось методом полного внешнего отражения рентгеновского излучения на установке [4, 5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение выходных ВАХ МОП-структур (рис. 1) показало, что транзисторы серии B обладают, как более высокими значениями тока стока I_C в режиме насыщения, так и более высокими напряжениями отсечки $U_{\text{отс}}$.

Так при напряжении на затворе $U_3 = 3.3$ В и ток стока $I_C = 0.3$ мА для приборов серии B , аналогичная величина для приборов серии A имеет значение 0.14 мА. Напряжение отсечки $U_{\text{отс}}$ составляет соответственно 2.1 и 1.4 В.

Если подвижность электронов μ_n не зависит от напряженности электрического поля, то ток насыщения $I_{\text{Снас}}$ в канале шириной W полевого транзистора с изолированным затвором будет определяться следующим образом [6]:

$$I_{\text{Снас}} = \frac{1}{2} \mu_n \frac{W}{L} C_D (U_3 - U_{\text{пор}})^2, \quad (1)$$

где C_D – удельная емкость диэлектрика; $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение, начиная с которого индуцированный затвором заряд в полупроводнике определяется подвижными носителями заряда и, следовательно, в приповерхностном слое полупроводника появляется проводящий канал (характерная толщина этого канала $\sim 100 \text{ \AA}$).

При постоянном U_3 согласно (1) и постоянстве отношения ширины канала W к его длине L наблюдаемые различия величины I_C , в первую очередь, можно связать с изменением напряжения отсечки $U_{\text{отс}} = U_3 - U_{\text{пор}}$. Поскольку отношения экспериментальных значений

$$I_C^B / I_C^A = 0.30 \text{ мА} / 0.14 \text{ мА} = 2.14$$

и

$$(U_{\text{отс}}^B / U_{\text{отс}}^A)^2 = (1.7 \text{ В} / 1.2 \text{ В})^2 = 2.01$$

($U_3 = 3.3$ В) для приборов серии A и серии B хорошо коррелируют между собой и согласуются с (1), то можно сделать вывод, что различия величин I_C и $U_{\text{отс}}$ для приборов серии A от соответствующих значений серии B обусловлены одной и той же причиной, которая, по-видимому, определяет величину порогового напряжения $U_{\text{пор}}$

$$U_{\text{пор}} = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_D}, \quad (2)$$

где ψ_B – разность между уровнем Ферми в используемом материале и в собственном полупроводнике, N_A – концентрация легирующей примеси p -подложки. Из (2) следует, что причиной изменения $U_{\text{пор}}$ (при условии однородного легирования подложки) является изменение C_D , связанное с неконтролируемым зарядом, локализованным в области МОП-конденсатора (затвора). Из анализа ВАХ был определен также ряд других важных параметров МОП-структуры: ток насыщения, ток стока, проводимость МОП-транзистора в ли-

Таблица 1. Параметры МОП-транзисторов, определенные из анализа вольт-амперных и стоковых характеристик

Параметры МОП-транзистора	Серия А	Серия В
Ток насыщения $I_{\text{Снас}}$ при $U_3 = 3.3$ В, мкА	138	280
Напряжение насыщения $U_{\text{СИнас}}$, В	1.20	1.90
Пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$, В	1.25	0.76
Крутизна характеристики МОП-транзистора в линейной области при $U_{\text{СИ}} = 0.2$ В, мкА/В	19	22.1
Крутизна характеристики МОП-транзистора в области насыщения при $U_{\text{СИ}} = 2.9$ В	100.3	175
Проводимость МОП-транзистора в линейной области при $U_{3И} = 0.2$ В, мкА/В	174	274

нейной области ВАХ, крутизна характеристики МОП-транзистора в линейной области. крутизна характеристики МОП-транзистора в области насыщения (табл. 1).

Для транзисторов серии А значение тока и напряжения насыщения, крутизна в линейной области и в области насыщения, проводимость в линейной области меньше, чем у транзисторов из В. А значение порогового напряжения у транзисторов из серии А выше, чем из серии В. Это свидетельствует о том, что МОП-транзисторы серии В обладают более высокими эксплуатационными характеристиками по сравнению с транзисторами из серии А.

Одна из возможных причин различия в параметрах двух серий МОП-транзисторов, вероятно также связана с величиной емкости подзатворного диэлектрика и его качеством, обусловленными наличием встроенного заряда. Для проверки данного предположения проведено сравнение отношения емкостей подзатворного диэлектрика МОП-транзисторов из различных серий (C_{iA}/C_{iB}), определенных в соответствии с [7, 8] на различных участках ВАХ исходя из: проводимости в линейной области, крутизны характеристики в линейной области, величины тока насыщения, крутизны в области насыщения (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что вне зависимости от метода оценки отношения C_{iA}/C_{iB} емкость C_{iB} выше емкости C_{iA} приблизительно на 20%, что однозначно свидетельствует о дополнительном заряде [2, 6, 7, 9] встроенном в слой окисла подзатворного диэлектрика МОП транзисторов серии А. Это обусловлено тем, что на границе раздела Si/SiO₂, полученной термическим окислением кремния, всегда присутствуют четыре различных по своей природе источника заряда: заряд быстрых поверхностных состояний в полупроводнике, постоянный заряд в окисле, заряд на ловушках в слое окисла и заряд подвижных ионов.

Энергетическая плотность быстрых поверхностных состояний, расположенных непосредственно на границе Si–SiO₂, сильно зависит от режима получения окисла. Величина постоянного заряда в окисле зависит от режима окисления,

условий отжига и вида предокислительных обработок кремниевых пластин и загрязнения системы Si/SiO₂ катионными примесями. Заряд на ловушках в слое окисла представляет собой объемный заряд, захваченный на энергетические уровни дефектов в SiO₂. Этот тип заряда ассоциируется с медленными поверхностными состояниями. Заряд подвижных ионов связан с присутствием в окисле ионов щелочных (Na⁺, K⁺, Li⁺) и тяжелых металлов, проникающими в окисел из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе. Другими составляющими заряда могут быть протоны и ионы H₃O⁺, ионы, адсорбированные на поверхности, кислородные вакансии, ловушки в окисле, полярные молекулы, попадающие в окисел из окружающей среды и материалов, используемых в технологическом процессе. Поверхностная плотность этих зарядов обычно лежит в пределах 10¹⁰–10¹² см⁻².

Исследованиями зависимости тока утечки подзатворного диэлектрика от напряжения на затворе установлено, что ток через подзатворный диэлектрик для структур серии В ниже соответствующего тока для структур из серии А примерно в 5 раз (рис. 2). Данный эксперимента свидетельствуют о том, что электрическое сопротивление пленок подзатворного диэлектрика у структур серии В выше, чем у аналогичных структур серии А. Причиной наблюдаемых различий тока утечки через диэлектрик для приборов серий А и В, вероятно,

Таблица 2. Отношение удельных емкостей подзатворного диэлектрика транзисторов в сериях А и В

Метод определения	Напряжение на затворе и стоке	C_{iA}/C_{iB}
По проводимости	$U_{\text{СИ}} = 0.2$ В, $U_{3И} = 3.3$ В	0.79
По крутизне в линейной области	$U_{\text{СИ}} = 0.2$ В	0.86
По току насыщения	$U_{3И} = 3.3$ В	0.76
По крутизне в области насыщения	$U_{\text{СИ}} = 3.5$ В, $U_{3И} = 2.9$ В	0.75

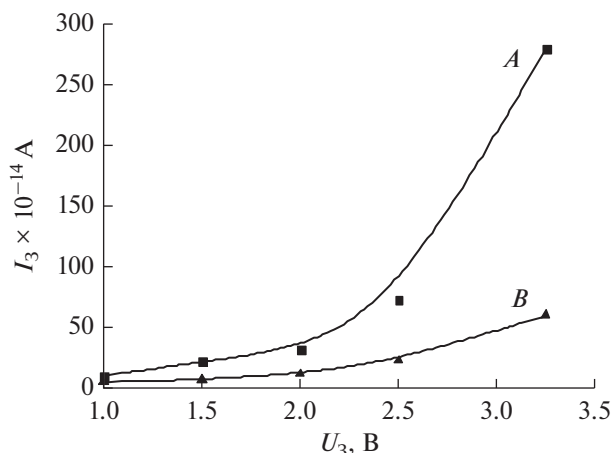


Рис. 2. Зависимость тока утечки затвора МОП-структуры от напряжения на затворе.

также является существенное загрязнение подзатворного диэлектрика приборов серии *A* технологическими примесями в процессе изготовления приборов.

Дополнительные данные о качестве подзатворного диэлектрика были получены из анализа вольт-фарадных характеристик МОП-структур (рис. 3). Для приборов серии *A* в случае измерений на *n*-кармане наблюдается сдвиг характеристик вдоль оси напряжений в сторону более отрицательных значений. Данный факт свидетельствует о наличии в диэлектрике для приборов этой серии дополнительного положительного эффективного неподвижного заряда, зарядовые состояния которого располагаются в объеме диэлектрика и не могут быть перезаряжены в течение эксперимента вследствие малой электронной проводимости диэлектрика. Кроме того, на кривых на вольт-фарадных характеристиках для приборов как серии *A*, так и *B*, наблюдается пик, характерный для низкочастотных ВФХ (рис. 3а).

Это обусловлено тем, что поверхностные состояния, расположенные вблизи середины запрещенной зоны, имеют времена релаксации $\sim 1.0\text{--}10$ мкс, а поверхностные состояния, находящиеся вблизи разрешенных зон (зона проводимости и валентная зона) $\sim 0.01\text{--}1.0$ 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, которые имели соответственно значения: 19.72 пФ и 0.174 В для приборов серии *B*, 21.08 пФ и 0.213 В для серии *A*.

Емкость и напряжения плоских зон при измерениях на *p*-кармане приборов серии *B* имеют соответственно значения 21.78 пФ и -1.05 В, для приборов серии *A* получены значения 21.72 пФ и -1.22 В. Существенного смещения кривых ВФХ по оси напряжений при данном режиме измерений не наблюдалось (рис. 3б). Сдвиг относительно теоретической кривой для обоих видов приборов был примерно одинаковым, что свидетельствует о примерном равенстве величин неподвижного дополнительного заряда в диэлектрике. Различие в наклонах кривых для приборов различных серий *B* обусловлено, как и в случае исследований на *n*-кармане, различием в плотности быстрых поверхностных состояний. Наибольшее несоответствие для ВФХ, измеренных на *p*-кармане, между приборами серий *A* и *B* наблюдается в области инверсии (рис. 3б), а в области обогатнения 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. Исходя из того, что поверхностные состояния расположены 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

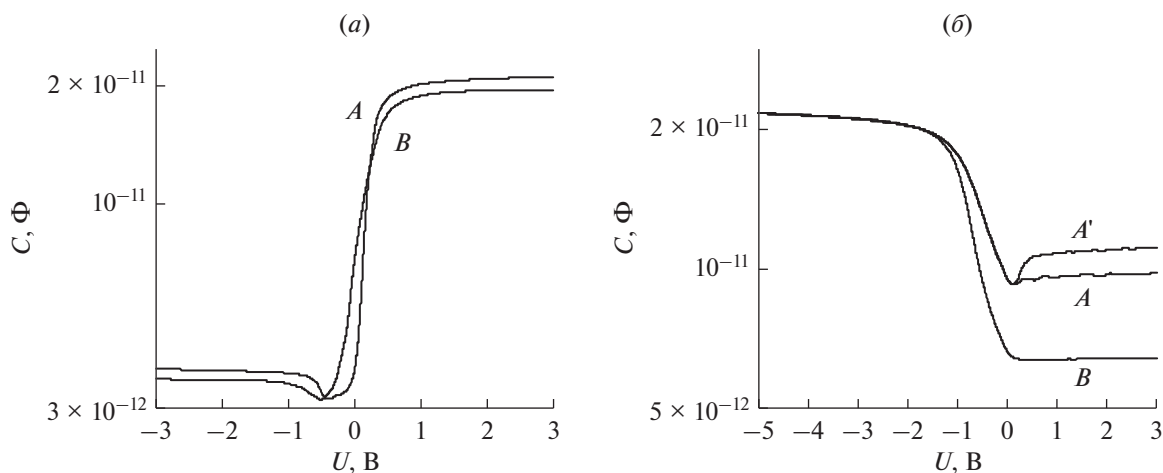


Рис. 3. ВФХ МОП-транзисторов, измеренные на *n*-кармане (а) и *p*-кармане (б).

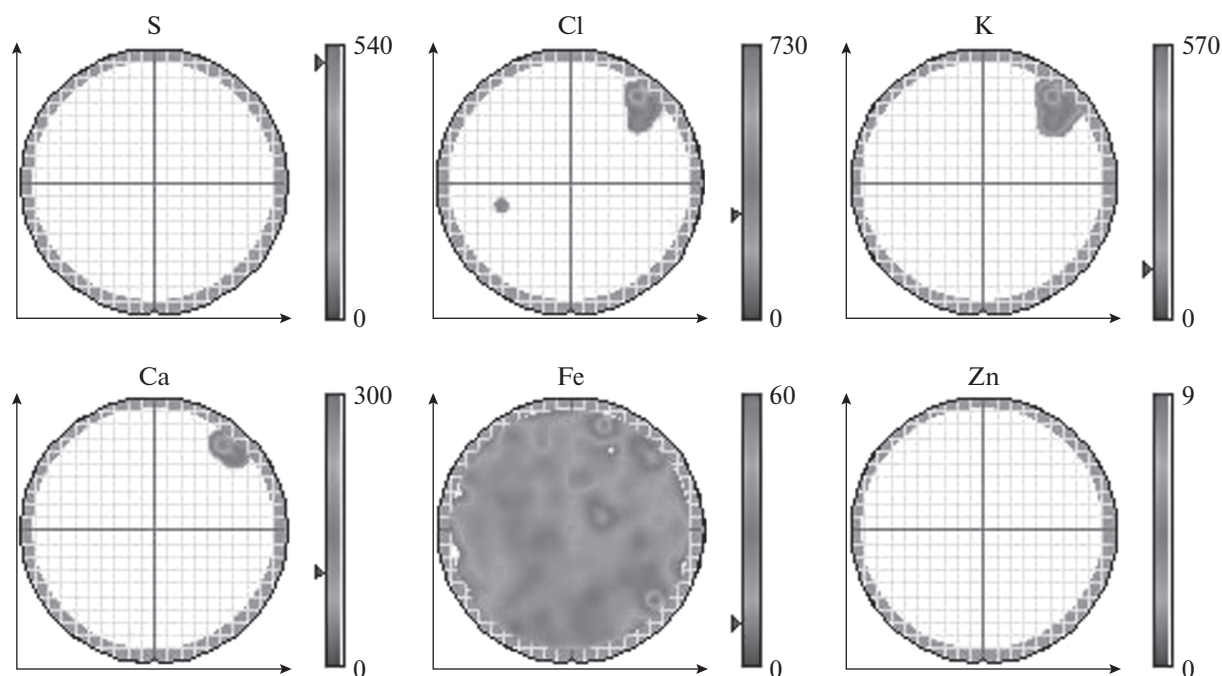


Рис. 4. Распределение технологических примесей по поверхности исходных кремниевых пластин, на которых были изготовлены приборы серии А.

на p -кармане для приборов серии В наблюдается пик, характерный для низкочастотных ВФХ (кривая А'). Это свидетельствует о том, что у приборов данной серии, в отличие от приборов серии В, наблюдаются быстрые поверхностные состояния со временами релаксации менее 1 мкс, вследствие чего генерация неосновных носителей и заполнение поверхностных состояний успевают следовать за изменениями внешнего напряжения. Отметим, что наличие пика на кривых ВФХ наблюдалось не для всех приборов серии А (рис. 3б), кривые А и А', эксперименты проводились более чем по 20 точкам (по поверхности пластины), 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 ионами H_3O^+ , ионами, адсорбированными на поверхности, кислородными вакансиями, ловушками в окисел, полярными молекулами, попадающими в окисел из окружающей среды 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 А показаны на рис. 4.

Наблюдаются локальные области, содержащие Cl (1.2×10^{12} ат./см²), К (1.6×10^{11} ат./см²), Са

(7.4×10^{10} ат./см²), а также Ti, Cr, Cu, Zn и других примесей. Вся поверхность пластины покрыта Fe со средней концентрацией $2.0 \cdot 10^{11}$ ат./см², причем по поверхности пластины данная примесь распределена существенно неравномерно. Типичные распределения технологической примеси железа по пластине показаны на рис. 5. Следует отметить, что данная технологическая примесь оказывает весьма негативное влияние на напряжение пробоя подзатворного диоксида кремния толщиной 3–10 нм. Так, при концентрации железа в объеме более 5×10^{11} ат./см³ происходит резкое уменьшение напряженности поля пробоя подзатворного диоксида кремния [10].

На топограммах пластин, на которых были изготовлены приборы серии В, наблюдаются только локальные области с повышенным содержанием Cl по периферии пластины. Содержание всех остальных примесей было ниже предела обнаружения ($\text{Fe} < 4.0 \times 10^9$ ат./см²). Количество частиц, захваченных поверхностью 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 окисле, заряда на ловушках в слое диэлектрика и заряда подвижных ионов.

При термическом окислении кремния и других высокотемпературных технологических опе-

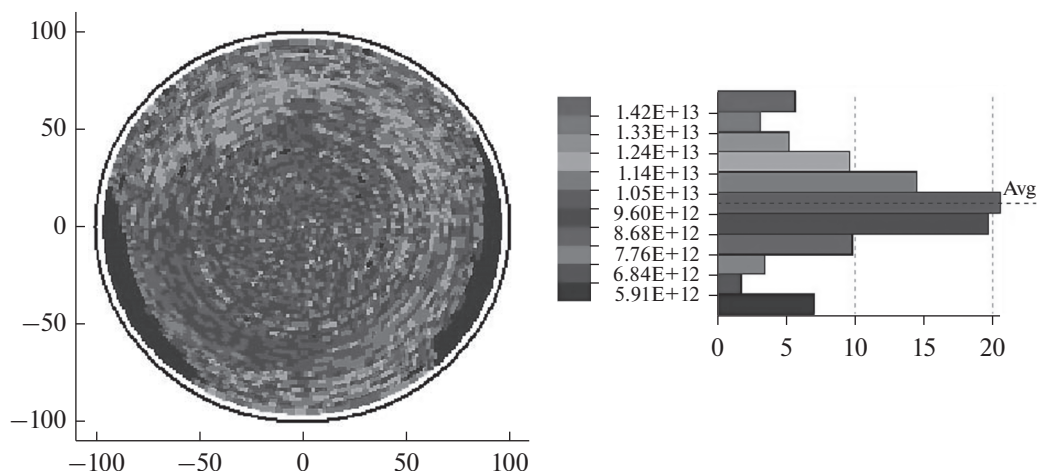


Рис. 5. Распределение концентрации железа по площади пластины для приборов серии А.

рациях, используемых при изготовлении приборов, многие неконтролируемые примеси, адсорбированные на его поверхности, частично десорбируются, а частично переходят в систему кремний – двуокись 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что дополнительный неконтролируемый заряд, локализованный в области затвора МОП-транзистора, в значительной мере обусловлен присутствием технологических (фоновых) примесей, попадающими в полупроводниковую структуру в процессе проведения технологических операций или присутствующие в определенном количестве в исходном полупроводниковом кристалле. Наличие дополнительного встроенного заряда в диэлектрике, а также быстрых поверхностных состояний на границе раздела SiO₂/Si приводит как к увеличению порогового напряжения, так и к снижению тока и напряжения насыщения, крутизны характеристики МОП-транзистора в линейной области и в области насыщения, проводимости структуры в линейной области. Возрастают также токи утечки затвора. Показано, что измерения вольт-фарадных характеристик МОП-структур позволяют проводить диагностику качества подзатворного диэлектрика. Вид и форма измеренных характеристик определяются величиной дополнительно-

го положительного заряда в объеме диэлектрика и плотностью быстрых поверхностных состояний на границе раздела Si/SiO₂. Данные значения коррелирует с профилем распределения поверхностной концентрации технологических примесей, адсорбированных на поверхности пластин в процессе изготовления приборов, что позволяет сделать заключение о качестве используемых материалов, соблюдении технологических режимов, а также (при необходимости) производить их своевременную соответствующую корректировку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базовые технологические процессы изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на кремнии. Под ред. Турцевича А.С. В 3 т. Минск: Интегралполиграф, 2013. 704 с.
2. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Изд-во физ.-мат. литература. 2008. С. 239–294.
3. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. М.: Высшая школа. 1986. С. 20–39.
4. SEMI M33-0988.
5. Berneike W., Knoth J., Schwenke H., Weisbrod U. // Fresenius Z. Anal. Chem. 1989. V. 333. P. 524–526.
6. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, M.K. Lee 3rd ed. John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. 582 p.
7. Денисенко В.В. Новые физические эффекты в нанометровых МОП-транзисторах // Компоненты и технологии. 2009. № 12.
8. Бочаров Л.Н. Полевые транзисторы. М.: Изд-во радио и связь, 1984. 103 с.
9. Зу С.М. Технология СБИС. В 2-х книгах. М.: Мир, 1986. 127 с.
10. Choi B.D., Schroder D.K. Degradation of ultrathin oxides by iron contamination // Applied Physics Letters. 2001. V. 79. № 16.