

Воротиллов Константин Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, зам. декана по научной работе факультета «Электроника» кафедры «Физика конденсированных сред» Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики.
E-mail: vorotilov@live.ru; vorotilov@mirea.ru
Область научных интересов: электроника и микроэлектроника.

Лучников Петр Александрович, заведующий лабораторией технологических исследований НИИ «Информатика» Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики.
E-mail: fisika@mail.ru
Область научных интересов: электроника и микроэлектроника.

Подгорный Юрий Владимирович, канд. техн. наук, ведущ. науч. сотр. кафедры «Физика конденсированных сред» Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики.
E-mail: podgsom_2004@mail.ru
Область научных интересов: электроника и микроэлектроника.

СерEGIN Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, мл. науч. сотр. кафедры «Физика конденсированных сред» Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики. Область научных интересов: электроника и микроэлектроника.

УДК 537.226: 621.3.049.772.1

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК МДП-СТРУКТУР

К.А. Воротиллов, П.А. Лучников, Ю.В. Подгорный,
Д.С. Серегин

Московский государственный
технический университет
радиотехники, электроники и автоматики
E-mail: fisika@mail.ru

Представлена методика точных измерений диэлектрической проницаемости ϵ изолирующих пленок нанометровых толщин в МДП-структурах на основе нелинейной аппроксимации экспериментальных зависимостей эквивалентной емкости МДП-структуры от частоты. В диапазоне частот четырехэлементная модель хорошо отражает комплексный импеданс МДП-структуры в аккумуляции. Учитывается влияние краевой емкости. Метрологические характеристики методики подтверждены результатами измерения ϵ пленки термического оксида кремния толщиной ~80 нм на кремнии. Получено значение диэлектрической проницаемости 3,825 с погрешностью 1,2 % при случайной составляющей 0,13 %.

Ключевые слова:

Тыльный контакт, емкость, краевой эффект, изолирующая пленка, термический оксид, диэлектрическая проницаемость, МДП-структура, омический контакт.

Key words:

Back contact, capacitance, edge effect, insulating film, thermal oxide, dielectric capacity, MIS-structure, ohmic contact.

Введение

В технологии производства полупроводниковых приборов остро стоит задача повышения диэлектрической проницаемости материала подзатворного диэлектрика транзисторных структур интегральных схем (ИС) [1, 2]. В ближайшие годы существует тенденция снижения толщины подзатворного диэлектрика до значений величины меньших ~1 нм. Однако в таких структурах токи прямого туннелирования и процессы диффузии бора ограничивают использование слоев термического оксида толщиной ~1 нм [2]. Современные ИС с минимальными топологическими размерами 45...65 нм

требуют использования диэлектрических материалов с низкой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon < 2,2$).

Известны два метода измерения емкости диэлектрика в структурах металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структура). Первый – квазистатический метод, сущность которого состоит в измерении тока, вызываемого изменением напряжения. Достоинство этого метода состоит в практическом отсутствии зависимости результатов измерения от качества контакта (тыльного) полупроводниковой подложки – пластины с нанесенным слоем диэлектрика, а недостаток очевиден – квазистатическим методом измеряется только статическая диэлектрическая проницаемость. Второй метод состоит в измерении емкости пленки на переменном токе в режиме аккумуляции основных носителей заряда в полупроводнике [3], и поэтому он лишен недостатка первого метода.

В настоящей работе рассмотрены особенности методики измерения на переменном токе емкости тонких диэлектрических пленок МДП-структур, а также влияние площади электродов, толщины пленки, частоты измерения и индуктивности соединительных проводников, краевой емкости на точность измерений паразитного импеданса тыльного контакта.

Образцы и измерительное оборудование

При отработке методики измерений использовались кремниевые пластины КДБ-10 толщиной 500 мкм, с выращенным слоем термического оксида кремния SiO_2 толщиной 10...100 нм. На поверхность пластин, покрытую слоем оксида кремния, методом литографии наносились алюминиевые электроды в форме квадратов с размерами сторон трех номиналов.

В качестве базового измерительного оборудования использовался комплекс производства фирмы Materials Development Corporation: высокоточный LCR-измеритель Agilent 4284A со встроенным источником постоянного смещения, держатель подложек типа MDC QuietCHUCK DK Hot Chuck System Model 490 в комплекте с зондовыми манипуляторами Model 825, калибровочная пластина MDC Model RW10.

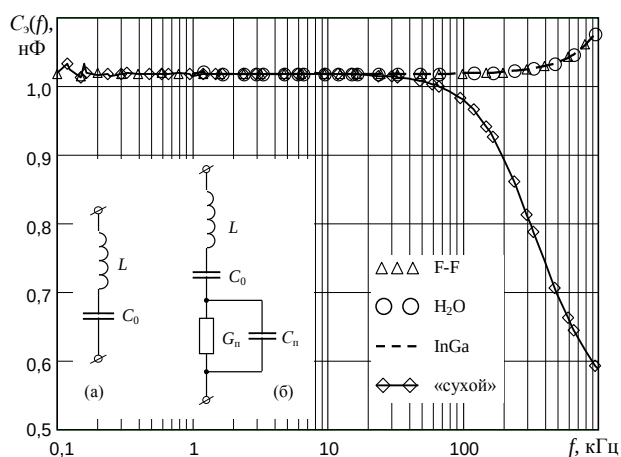


Рис. 1. График экспериментальной зависимости эквивалентной емкости $C_z(f)$ калибровочного конденсатора C_0 от частоты измерения при подключении по схеме F-F и при различных видах контакта F-V полупроводниковой подложки с держателем образца. На вставке (а) и (б) – двух- и четырехэлементные эквивалентные схемы для подключений емкостных образцов F-F и F-V соответственно

Влияния паразитных параметров измерительной схемы

При измерениях на высоких частотах (выше десятков кГц) существенное влияние на результаты измерений может оказывать паразитная индуктивность, которая может достигать нескольких единиц микрогенри, а также паразитный импеданс тыльного контакта МДП-структуры. Емкость конденсаторов калибровочной пластины RW10 измерялась в диапазоне частот 0,2...1000 кГц. Исследуемые МДП-структуры и пластина RW10 размещались на держателе образца QuietCHUCK.

Измерительный комплекс позволяет проводить испытания образцов диэлектрика двумя способами подключения объектов емкости пластины RW10 к измерителю LCR. При первом стандартном

подключении F-B, которое используется при измерении вольтфарадных характеристик или концентрации свободных носителей, в цепи подключения к прибору участвуют, с одной стороны, контакт металлического основания пластины RW10 с держателем образца далее тыльный контакт, а с другой – зондовый манипулятор, контактирующий с электродом конденсатора на лицевой поверхности пластины. При втором альтернативном подключении F-F в цепи объекта измерений вместо тыльного контакта участвует второй зондовый манипулятор, который подключается к общему электроду «SHORT» на лицевой поверхности пластины RW10, электрически соединенному с ее основанием. Для надежного электрического контакта с тыльной стороной пластины с образцом и держателем образца использовалась электропроводящая прослойка из пленки технической воды (электролита) или эвтектики InGa.

На рис. 1 представлены графики экспериментальной зависимости эквивалентной емкости $C_3(f)$ калибровочного конденсатора C_0 от частоты измерения при подключении по схеме F-F и при различных видах контакта F-B полупроводниковой подложки с держателем образца. На вставке рис. 1, а, и рис. 1, б, показаны двух- и четырехэлементные эквивалентные схемы для подключений емкостных образцов F-F и F-B соответственно.

Измерительную ячейку емкости пластины RW10 с учетом паразитных параметров и идеальными электрическими контактами можно представить в виде эквивалентной схемы последовательного колебательного контура рис. 1, а, и в виде рис. 1, б, при подключении образца с прижимным контактом с тыльной стороны полупроводниковой пластины с диэлектрическим слоем эквивалентная схема. В последнем случае учитываются параметры сопротивления $R_n = 1/G_n$ (электрической проводимости G_n) и емкости C_n прижимного «сухого» контакта пластина-основание ячейки.

Экспериментальные исследования параметров эквивалентной емкости образца C_3 калибровочного конденсатора C_0 в зависимости от частоты при подключениях F-F и F-B с прослойками воды и эвтектики InGa в контакте тыльной стороны пластины полупроводника показали, что согласно схеме рис. 1, а, возможно проводить нелинейную аппроксимацию C_3 моделирующей функцией вида:

$$C_3(\omega) = C_0 \cdot \left(1 - \omega^2 \cdot L \cdot C_0\right)^{-1}, \quad (1)$$

где C_0 и L – параметры аппроксимации (емкость эталонного конденсатора и паразитная индуктивность соединительных экранированных проводников с зондовыми манипуляторами соответственно); $f = \omega / 2\pi$ – частота измерения, Гц; ω – круговая частота.

Для случая «сухого» контакта с тыльной стороны МДП-структуры в измерительной ячейке, аппроксимацию C_3 удобно проводить согласно 4-х элементной эквивалентной схеме подключения F-B с учетом паразитных параметров индуктивности и сопротивления $R_n = 1/G_n$ и емкости C_n «сухого» контакта, т. е. дополнительного паразитного импеданса тыльного контакта. Составляющие эквивалентной комплексной проводимости $G(\omega)$ такой цепи согласно параллельной схеме замещения, определяются как:

$$C_3(\omega) = \frac{C_0}{1 - \omega^2 C_0 L} \cdot \frac{G_n^2 + \omega^2 C_n \left(C_n + \frac{C_0}{1 - \omega^2 C_0 L} \right)}{G_n^2 + \omega^2 \left(C_n + \frac{C_0}{1 - \omega^2 C_0 L} \right)^2}; \quad (2)$$

$$G_3(\omega) = \frac{G_n}{G_n^2 + \omega^2 \left(C_n + \frac{C_0}{1 - \omega^2 C_0 L} \right)^2} \cdot \left(\frac{\omega C_0}{1 - \omega^2 C_0 L} \right)^2. \quad (3)$$

В табл. 1 приведены результаты аппроксимации в диапазоне 1...1000 кГц, в том числе среднее квадратичное отклонение (СКО), отнесенное к значению емкости C_0 конденсатора. Высокая точность аппроксимации подтверждает соответствие выбранной модели рассматриваемым подключениям. Необходимо отметить, из аппроксимации исключались

результаты измерений на частотах ниже 1 кГц, так как показаниям *LCR*-метра в этом диапазоне частот присуща нестабильность, увеличивающая погрешность аппроксимации.

Из рис. 1 видно, что регрессионная аппроксимация экспериментальной зависимости эквивалентной емкости пластины RW10 в диапазоне 1...1000 кГц при включении F-B «сухой» контакт (рис. 1, б) функцией (2). Здесь C_0 , C_n и G_n – аппроксимирующие параметры емкости при паразитной индуктивности определяемой схемой включения F-B с водой (табл. 1), которая имеет следующие значения $C_0 = 1016,7$ пФ, $R_n = 215$ Ом и $C_n = 1048$ пФ [4]. Точность аппроксимации повышается в более узком диапазоне частот. Например, в диапазоне частот 1...500 кГц получаются значения $C_0 = 1017,2$ пФ, $R_n = 216$ Ом и $C_n = 1139$ пФ при СКО равном 0,1 %.

Таблица 1. Определение паразитной индуктивности при различных способах подключения RW10 на держателе образца QuietCHUCK

Тип подключения образца	C_0 , пФ	СКО, %	L_n , мкГн
F-F	1017,9	0,07	1,67
F-B _{InGa}	1018,1	0,06	1,49
F-B _{H2O}	1018,1	0,06	1,47

При подключении F-B «сухой» контакт, при котором поверхности подложки и держателя образца только предварительно зачищались, на высоких частотах наблюдаются заниженные результаты относительно подключения F-F. Расхождение заметно на частотах выше 20 кГц, что говорит о существенном паразитном импедансе «сухого» контакта полупроводниковой подложки с держателем образца (тыльного контакта). С целью уменьшения паразитного импеданса в качестве прослойки между контактирующими поверхностями использовалась эвтектика индия/галлия InGa или техническая вода. При подключении F-B с этими прослойками наблюдаются зависимости идентичные подключению F-F (рис. 1). Завышенные результаты измерений на высоких частотах, связаны с паразитной индуктивностью L соединительных проводников.

Определение толщины изолирующей пленки

Определение толщины изолирующего слоя на кремнии осуществлялось эллипсометром ЛЭФ-3М. Среднее значение толщины $\bar{d}$ из 27 результатов измерений составило 88,5 нм при СКО 0,7 нм, что соответствует случайной составляющей, $\delta_{\bar{d}}$, относительной погрешности определения среднего значения толщины 0,16 %.

Металлические электроды на изолирующей пленке МДП-структуры обычно изготавливают методом литографии или используют процесс напыления электродов через теневую маску, клейкую ленту [5] или при помощи ртутного манипулятора, что приводит к значительной погрешности определения площади электрода.

Нами при отработке методики использовался стандартный процесс литографии по алюминию. На слое оксида кремния формировались электроды трех типоразмеров. Размеры сторон a_i квадратных электродов каждого типоразмера на МДП-структуре измерялись микроскопом OLYMPUS BX51. По результатам измерения рассчитывались средние площади электродов ($\bar{S}_j$), абсолютное (ΔS) и относительное ($\delta_{\bar{S}}$) СКО среднего значения $\bar{S}$: $\delta_{\bar{S}} = \Delta S / (\bar{S} \cdot \sqrt{N_{эл}})$, где $N_{эл}$ – число электродов, в которой так же приведены значения геометрической емкости, рассчитанные по формуле:

$$C_r = \frac{\bar{S}}{3,6 \pi \bar{d}}, \text{ пФ}, \quad (4)$$

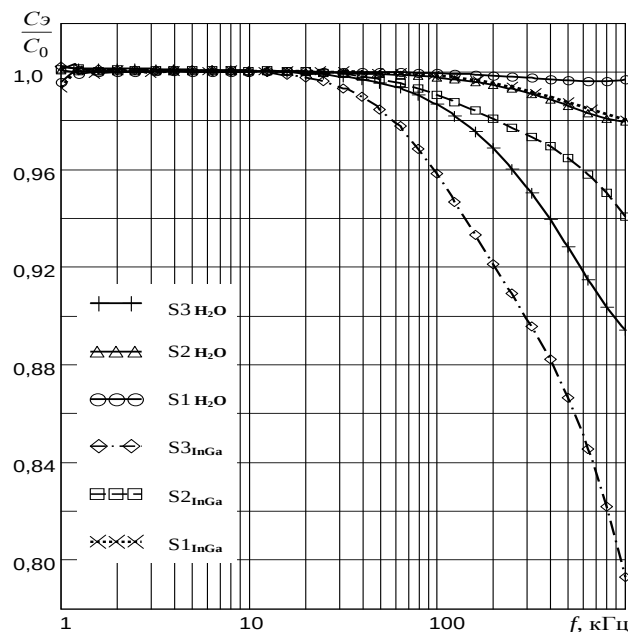


Рис. 2. График зависимости относительного изменения эквивалентной емкости $C_э/C_0$ МДП-структуры от частоты измерения при различной площади электродов S1, S2 и S3 с прослойками эвтектики InGa и пленки воды между подложкой и держателем образца

площади электродов, *во-вторых*, прослойка воды по сравнению с InGa более эффективно способствует уменьшению паразитного импеданса тыльного контакта, например, для площади S1 с эвтектикой и для площади S2 с водой зависимости практически совпадают, хотя отношение этих площадей равно четырем.

Определение параметров четырехэлементной модели МДП-структуры с учетом импеданса тыльного контакта (рис. 1, б) осуществлялось нелинейной регрессионной аппроксимацией экспериментальных значений эквивалентных емкости и проводимости МДП-структуры формулами (2) и (3) соответственно. При аппроксимации определяется вектор-функция $\Phi(x, k)$, где x – переменная (частота измерения ω), а k – вектор аппроксимирующих параметров. Вектор-функция помимо самой аппроксимирующей функции содержит ее частные производные относительно параметров: $k_0 \rightarrow (G_n)^2$; $k_1 \rightarrow C_n$ и $k_2 \rightarrow C_0$. После определения стартовых значений параметров k в виде вектора vg вызывается функция $p = \text{genfit}(vx, vC_э, vg, \Phi)$, где vx_i – вектор дискретных значений частоты измерения, и $vC_э_i$ или $vG_э_i$ – результаты N дискретных измерений в диапазоне частот эквивалентных емкости или проводимости МДП-структуры.

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров МДП-структуры через аппроксимацию ее эквивалентной емкости (2). Значения диэлектрической проницаемости рассчитывались по формуле:

Определение емкости изолирующей пленки

В диапазоне частот 0,2...1000 кГц в режиме аккумуляции измерялась емкость трех конденсаторов МДП-структуры с электродами каждой номинальной площади. Для уменьшения паразитного импеданса контактные поверхности подложки и держателя образца обезжиривались и использовались прослойки эвтектики InGa или дистиллированной воды.

На рис. 2 представлен график экспериментальных зависимостей относительного изменения эквивалентной емкости $C_э/C_0$ МДП-структуры от частоты измерения при различной площади электродов S1, S2 и S3 с прослойками эвтектики InGa и пленки воды между подложкой и держателем образца.

Из рис. 2 видно, что зависимость нормированных значений емкости изолирующей пленки на подложке (МДП-структур) дает: *во-первых*, относительное занижение измеренных значений эквивалентной емкости МДП-структуры с увеличением частоты оказывается более значительным чем при увеличении

$$\varepsilon_{ij} = C_{0ij} / C_{Tj}, \quad (5)$$

где индекс i соответствуют номеру результата измерения для j -ой площади электрода.

Из приведенных результатов видно, что значение паразитного импеданса тыльного контакта структуры с держателем образца при использовании промежуточного слоя дистиллированной воды в два-три раза меньше значения в случае использования эвтектики InGa.

В табл. 3 приведены значения параметров четырехэлементной эквивалентной схемы МДП-структуры с прослойками воды и индия/галлия, рассчитанные через аппроксимацию уравнением (3) экспериментальных зависимостей эквивалентной проводимости от частоты.

Таблица 2. Параметры МДП-структуры с прослойками воды и индия/галлия получены аппроксимацией эквивалентной емкости

$S_j, \text{мм}^2$	S1 = 0,192		S2 = 0,779		S3 = 3,13		
Прослойка	InGa	H ₂ O	InGa	H ₂ O	InGa	H ₂ O	
$F, \text{кГц}$	1÷500	1÷1000	1÷500	1÷500	1÷500	1÷500	2,5÷300
N	55×3	61×3	55×3	55×3	55×3	55×3	42×3
$R_n, \text{Ом}$	122,8	40,7	114,7	39,3	114,9	50,0	47,8
$C_n, \text{пФ}$	3600	7888	6700	10530	6700	9161	13970
$C_{0ij}, \text{пФ}$	73,87	73,67	298,0	297,7	1194,6	1193,4	1193,8
СКО _{C0} , %	0,101	0,06	0,107	0,038	0,366	0,179	0,083
ε_{ij}	3,851	3,839	3,829	3,823	3,825	3,819	3,820

Таблица 3. Параметры МДП-структуры с прослойками индия/галлия и воды получены через аппроксимацию зависимости эквивалентной проводимости от частоты в диапазоне частот 1...300 и 2,5...500 кГц соответственно

$S_j, \text{мм}^2$	S1 = 0,192		S2 = 0,779		S3 = 3,126	
Прослойка	InGa	H ₂ O	InGa	H ₂ O	InGa	H ₂ O
$R_n, \text{Ом}$	93,6	38,6	98,6	29,2	117	40,3
$C_n, \text{пФ}$	5540	10900	8810	15200	9470	13700
$C_{0ij}^*, \text{пФ}$	78,6	67	301,0	210	1170	820
СКО _C , %	0,39	0,42	0,89	0,49	0,50	0,51

Получены значения составляющих R_n и C_n паразитного импеданса близкие к результатам аппроксимации по уравнению (2), однако значения емкости пленки C_{0ij}^* получаются заниженными на 10...30 %.

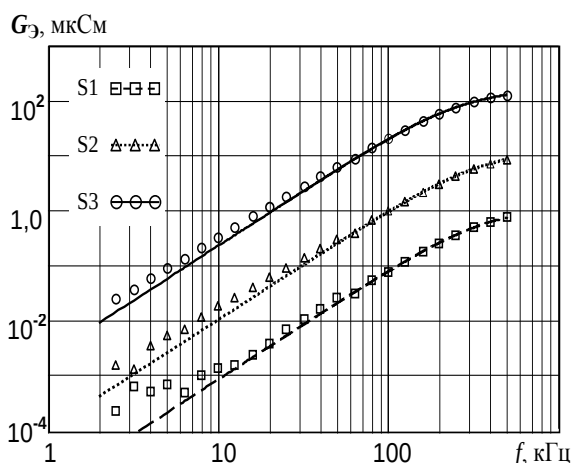


Рис. 3. График зависимости эквивалентной проводимости $G_{\varepsilon}(f)$ МДП-структуры от частоты электрического поля при трех значениях площади электродов: S1, S2 и S3

На рис. 3 представлен график экспериментальных зависимостей от частоты эквивалентной проводимости $G_{\varepsilon}(f)$ и их аппроксимации по уравнению (3) МДП-структуры с прослойкой воды в тыльном контакте при трех значениях площади электродов: S1, S2 и S3.

Сопоставление результатов, приведенных в табл. 2 и 3, показывает, что для определения параметров 4-х элементной модели достаточно использовать нелинейную аппроксимацию экспериментальной зависимости от частоты эквивалентной емкости МДП структуры.

Влияние краевой емкости на точность измерений

Расхождение между емкостью, измеренной в устройстве с двумя выводами (без охранного электрода), и емкостью, вычисленной на основании диэлектрической проницаемости и размеров образца, равно емкости потенциального электрода на землю плюс краевая емкость [6].

Расчет диэлектрической проницаемости по формуле $\varepsilon = C_{0ij}/C_{гj}$ подразумевает допущение однородного поля между измерительными электродами, т. е. не учитывается искривление (отклонение) силовых линий у краев, которое можно учесть путем введения поправки на краевую емкость. Искомая величина ε вычисляется по формуле:

$$\bar{\varepsilon} = (C_{0ij} - C_{кp j}) / C_{г j}, \quad (6)$$

где $C_{кp j}$ – поправка на поле рассеяния для соответствующих геометрических размеров электрода; $C_{г j}$ – геометрическая (вакуумная) емкость.

Для ряда конфигураций электродов с образцом существуют эмпирические формулы вычисления краевой емкости [6], независимой от формы электродов. Для нашего случая конфигурации электрод/образец/электрод (подложка), когда толщина электрода и его размеры много меньше толщины пленки и размеров подложки соответственно, поправку (абсолютную погрешность) на поле рассеяния можно рассчитать по формуле:

$$C_{кp} / P = (0,041 \cdot \varepsilon - 0,72 \cdot \lg d + 0,045) \quad [\text{пФ/см}], \quad (7)$$

где P – периметр металлического электрода ($P = 4 \cdot a_j$), см; ε – приблизительно определенная диэлектрическая проницаемость. Из (7) следует, что краевая емкость возрастает с увеличением измеряемой диэлектрической проницаемости и толщины пленки. С учетом выражений (4), (5), (6) и (7) получаем выражение для расчета составляющей относительной погрешности (поправки) $\delta\varepsilon_{кp}$, обусловленной краевой емкостью в виде:

$$\delta\varepsilon_{кp} = 14,4 \cdot d \cdot \frac{0,041 \cdot \varepsilon - 0,72 \cdot \lg d + 0,045}{a \cdot \varepsilon} \cdot 100, \%. \quad (8)$$

На рис. 4 представлены график расчетных (по формуле (8) без учета краевого эффекта) зависимостей составляющей погрешности $\delta\varepsilon_{кp}$, обусловленной полем рассеяния краевой емкости, от диэлектрической проницаемости ε пленки толщиной 88,5 нм на подложке с квадратными электродами размером одной стороны: 1) 0,22 мм, 2) 0,44 мм, 3) 0,88 мм, 4) 1,77 мм.

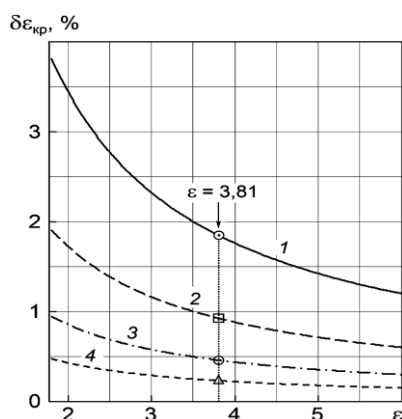


Рис. 4. График расчетной зависимости погрешности $\delta\varepsilon_{кp}$ от значения диэлектрической проницаемости ε пленочных образцов оксида кремния с различной площадью электродов

Расчет диэлектрической проницаемости пленки диоксида кремния без учета краевой емкости дает завышенные значения искомой величины. Как видно из формулы (8), составляющая погрешности измерения ε , обусловленная краевой емкостью, уменьшается обратно пропорционально линейным размерам электрода и увеличивается с толщиной пленки. Для электродов с площадью $S1$, $S2$ и $S3$ значения погрешности $\delta\varepsilon_{кp}$ составляют 0,92, 0,46 и 0,23 % соответственно, что находится в хорошей корреляции с экспериментальными данными. При электродах с наименьшей площадью $S1$ наблюдается завышение расчетного значения ε , обусловленного краевой емкостью.

Исследования показали, что размеры электродов с площадью $S2$ близки к оптимальным, поскольку влияние краевой емкости не превышает 0,5 %.

Результаты измерений диэлектрической проницаемости пленки в МДП-структуре

В табл. 2 приведены результаты трех групп измерений емкости изолирующей пленки C_0 , среднего квадратичного отклонения и оценки значений ε_j , соответствующие номинальным площадям электродов. Оценка искомого значения диэлектрической проницаемости термического оксида кремния как среднего взвешенного $\bar{\varepsilon}$ [7]:

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{j=1}^K g_j \cdot \bar{\varepsilon}_j, \quad (9)$$

где K – число групп наблюдений; $\bar{\varepsilon}_j$ – оценка значения ε j -той группы наблюдений; g_j – весовой коэффициент j -той группы наблюдений, дает значение 3,825 при случайной составляющей относительной погрешности $\delta_{\bar{\varepsilon}} = 0,13 \%$.

При оценке погрешности измерения ε изолирующей пленки помимо случайной составляющей $\delta_{\bar{\varepsilon}}$, как следует из формул (4) и (6), необходимо учесть составляющие, обусловленные погрешностями измерения геометрических размеров электродов $\delta_{\bar{S}}$, определения средней толщины изолирующего слоя $\delta_{\bar{d}}$, учета краевой емкости $\delta_{\text{кр}}$. Эти погрешности являются условно постоянными [10] и определяются погрешностями соответствующих измерительных приборов, так как случайными составляющими, как следует из результатов измерений геометрических размеров электродов и толщины пленки, можно пренебречь. Погрешности эллипсометра ЛЭФ-3М и микроскопа OLYMPUS BX51 составляют 1 % и 0,5 % соответственно. Оценка суммарной погрешности измерения ε пленки оксида кремния вычислена по формуле:

$$\delta_{\varepsilon} = \sqrt{(\delta_{\bar{\varepsilon}})^2 + (\delta_{\bar{S}})^2 + (\delta_{\bar{d}})^2 + (\delta_{\text{кр}})^2} = \sqrt{0,13^2 + 0,5^2 + 1^2 + 0,24^2} < 1,2 \%.$$

Сопоставление значения диэлектрической проницаемости стандартного образца (СО ДПКД-2 ВСНИИФТРИ), изготовленного из оптического кварцевого стекла КВ согласно ГОСТ 15130-86 толщиной 2 мм: $\varepsilon = 3,81 \pm 1 \%$ показало, что фактическая разница между значениями ε стандартного и исследованного нами образцов не превышает 0,4 %.

Выводы

Разработана методика точных измерений диэлектрической проницаемости изолирующих пленок наноразмерных толщин в МДП-структурах. Метрологические характеристики методики подтверждены результатами измерения параметров термического оксида кремния на кремнии. Получено значение диэлектрической проницаемости 3,825 с суммарной погрешностью 1,2 % при случайной составляющей 0,13 %.

Четырехэлементная модель МДП-структуры в аккумуляции хорошо отражает частотную зависимость ее эквивалентных параметров, определение которых двумя разными способами дает хорошую сходимость.

Нелинейная аппроксимация зависимости эквивалентной емкости МДП-структуры от частоты позволяет с высокой точностью определять емкость и диэлектрическую проницаемость реальной тонкой изолирующей пленки.

Дана оценка погрешности, вносимой краевой емкостью в измерение диэлектрической проницаемости, и приведена методика ее учета.

Показано, что уменьшение площади электродов МДП-конденсатора приводит к снижению составляющих погрешности измерения диэлектрической проницаемости изолирующих пленок в области высоких частот, обусловленных паразитным импедансом тыльного контакта МДП-структуры и паразитной индуктивностью соединительных проводников. С другой стороны, ограничением уменьшения площади электродов является увеличение составляющих погрешности, обусловленных возрастающим влиянием как краевой

емкости МДП-структуры и погрешностью квантования и нестабильностью измерителя *LCR*, возрастающей на частотах ниже 1 кГц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В.А., Серегин Д.С., Воротилов К.А. Гибридные пористые силикатные пленки с управляемой наноструктурой // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 12. – С. 23–28.
2. Thin films and heterostructures for oxide electronics / под ред. S.B. Ogale. – NY.: Springer Science+Business Media, Inc., 2005. – 419 p.
3. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
4. Подгорный Ю.В., Серегин Д.А., Путилин А.В., Лучников П.А., Воротилов К.А. Методика измерения диэлектрической проницаемости изолирующих слоев на полупроводниковых подложках // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2009. – Т. 9. – Ч. 1. – С. 231–234.
5. Ciofi I., Baklanov M. R., Tőkei Z., Beyer G. P. Capacitance measurements and κ -value extractions of low- κ films // Microelectronic Engineering. – 2001. – V. 87. – P. 2391–2406.
6. ГОСТ 22372-77 Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц. – М., 1977.
7. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.

Поступила 02.11.2011 г.