

УДК 621.315.61.015.32:621.319.4

МОП-КОНДЕНСАТОРЫ ПОВЫШЕННОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ СУБМИКРОННЫХ СБИС

Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 9 января 2003

Предложен вариант комбинированного диэлектрика $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$, для конденсаторов СБИС. Дан анализ его электрофизических и механических свойств. Рассмотрено влияние толщины каждого из диэлектриков на электрофизические свойства. Установлена зависимость изменения эффективного встроенного заряда в пленке Ta_2O_5 от радиуса кривизны пластины. На основании изучения характеристик тестовых конденсаторов с различными вариантами толщины пленок SiO_2 и Ta_2O_5 определено оптимальное сочетание толщины пленок. Проведено промышленное опробование разработанного диэлектрика на экспериментальных партиях пластин.

Ключевые слова: пленки с высокой диэлектрической проницаемостью, МОП-конденсаторы, свойства, применение в СБИС.

Введение

Анализ данных по разработке и использованию новых диэлектрических материалов для конденсаторов ИМС показывает, что многослойные диэлектрики имеют для этих целей хорошие перспективы. Возможность усиления преимуществ одного диэлектрика путем использования его в комбинации с другим, многовариантность таких комбинаций выдвигают многослойные диэлектрики на ведущие позиции для применения их в конструировании и технологии производства быстродействующих элементов памяти. Особого внимания заслуживают пленки Ta_2O_5 в комбинации с другими диэлектриками.

В современных условиях постоянного увеличения степени интеграции СБИС высокое значение диэлектрической проницаемости у пленок Ta_2O_5 привлекает к нему разработчиков интегральных схем [1, 2]. Ta_2O_5 имеет диэлектрическую проницаемость 21–27, достаточно большую ширину запрещенной зоны $E=4,2$ эВ, электрическую прочность $6 \cdot 10^6$ В/см. Кроме того, у Ta_2O_5 установлена хорошая воспроизводимость процессов формирования и сочетаемость с SiO_2 [3]. Комбинирование с другими диэлектриками позволяет устранить имеющиеся у Ta_2O_5 недостатки [4].

Методика

На втором этапе были изготовлены тестовые конденсаторы с комбинированным диэлектриком $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$. Варианты соотношений толщин в комбинированном диэлектрике $\text{Ta}_2\text{O}_5:\text{SiO}_2$ составляли: $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5}:h_{\text{SiO}_2}=10:90$ нм; 50:50 нм; 80:20 нм. Выбор толщины пленок в указанных вариантах определялся с учетом рассчитанных ранее с помощью математической модели пропорций [6], при которой механические напряжения в структуре $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Ta}_2\text{O}_5$ минимальны. Минимальное напряжение было зафиксировано при соотношении $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5}:h_{\text{SiO}_2}=1:9,78$. Именно таким был выбран

первый вариант тестового конденсатора. Два других варианта выбраны для изучения поведения параметров конденсаторов с отклонениями толщин от тех значений, при которых напряжения минимальны. Выбор данных соотношений обусловлен также тем, что с увеличением толщины пленки Ta₂O₅ происходит рост диэлектрической проницаемости конденсаторного диэлектрика и, следовательно, повышение его емкости. Вместе с тем необходимо было проследить за изменением остальных параметров конденсатора при увеличении его емкостных характеристик.

На сформированных конденсаторах с помощью метода тестового контроля исследовались емкость структуры, токи утечки и пробивное напряжение.

Исследование свойств конденсаторного диэлектрика на основе оксида тантала

Изучение электрофизических свойств и остаточных механических напряжений в комбинированных пленках SiO₂/Ta₂O₅, полученных на первом этапе исследований, показало что:

положительный заряд в комбинированном диэлектрике SiO₂-Ta₂O₅ с ростом механических напряжений не только остается постоянным, но и имеет тенденцию к уменьшению;

в пленке Ta₂O₅ с ростом механических напряжений увеличивается встроенный отрицательный заряд;

именно увеличение встроенного отрицательного заряда в пленке Ta₂O₅ способствует компенсации и снижению встроенного положительного заряда во всей системе в целом при возникновении механических напряжений;

токи утечек с ростом механических напряжений возрастают [7].

Полученные экспериментальные данные по исследованию электрофизических свойств пленок и разработанная математическая модель упругих напряжений в системе Si/SiO₂/Ta₂O₅ позволили рассчитать соотношение толщин оксида кремния и оксида тантала, при которых пластина имеет минимальный прогиб.

Целью исследований тестовых диэлектрических структур являлся выбор состава комбинированного диэлектрика для конденсатора ячейки памяти с оптимальными электрофизическими параметрами: максимальной емкостью, минимальными значениями тока утечки, пробивного напряжения и механических напряжений кривизны структуры.

Для проведения исследований электрофизических параметров конденсаторных диэлектриков использовались тестовые конденсаторы с диэлектриками на основе SiO₂ и Ta₂O₅/SiO₂. Конденсаторы обоих типов имели одинаковые геометрические размеры, а именно площадь обкладок составляла 0,09 мм², суммарная толщина конденсаторного диэлектрика — 100 нм.

Основным показателем исследуемого комбинированного диэлектрика является емкость структуры. На рис. 1 представлена зависимость величины полученных емкостей тестовых конденсаторов от толщины диэлектриков, из которой видно, что наибольшие значения, как и предполагалось, имеют конденсаторы с максимальной толщиной пленки Ta₂O₅ в составе конденсаторного диэлектрика, т.е. для соотношения $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5}:h_{\text{SiO}_2}=80:20$ нм. Конденсаторы же с сочетанием толщин $h_{\text{Ta}_2\text{O}_5}:h_{\text{SiO}_2}=10:90$ нм, при которых фиксируются минимальные механические напряжения, имеют и минимальную емкость в группе конденсаторов с комбинированным диэлектриком, и она лишь незначительно отличается от конденсаторов с однослойным диэлектриком. Емкости измерялись на частоте 100 кГц. Рассчитанные по данным измерений значения диэлектрической проницаемости составили для указанных ранее соотношений толщин пленок 5,10; 10,83; 19,5. Следует отметить, что полученные экспериментальные значения меньше получаемых расчетным путем. Для данных геометрических размеров и толщин диэлектриков ϵ должна составлять 5,95; 11,40; 22,06 соответственно для указанных вариантов. Снижению ϵ могло способствовать образование кристаллической фазы в пленках Ta₂O₅ и SiO₂.

Одним из важных параметров конденсаторной структуры является ток утечки конденсаторного диэлектрика. Он характеризует время хранения заряда в ячейки памяти, что является важнейшей характеристикой динамической памяти. На рис. 1 приведена зависимость величины токов утечки тестовых конденсаторов от соотношения толщин диэлектриков, измеренные при напряжении 5 В на обкладках тестовых конденсаторных структур. Как видно из приведенных результатов, наблюдаются отличия для конденсаторов с различными толщинами Ta₂O₅. Это отличие носит системный характер, а именно ток утечки конденсаторов возрастает с увеличением толщи-

ны пленки Ta_2O_5 в составе конденсаторного диэлектрика (в то же время растет и емкость конденсаторов) и достигает максимального значения при соотношении $h_{Ta_2O_5}:h_{SiO_2}=80:20$ нм. Для величины напряженности электрического поля $5 \cdot 10^8$ В/м, на которой принято оценивать этот параметр, ток утечки составляет величину $(1,7-3,1) \cdot 10^{-12}$ А для однослойной и $(2,5-3,9) \cdot 10^{-12}$ А для двухслойной конденсаторной структуры.

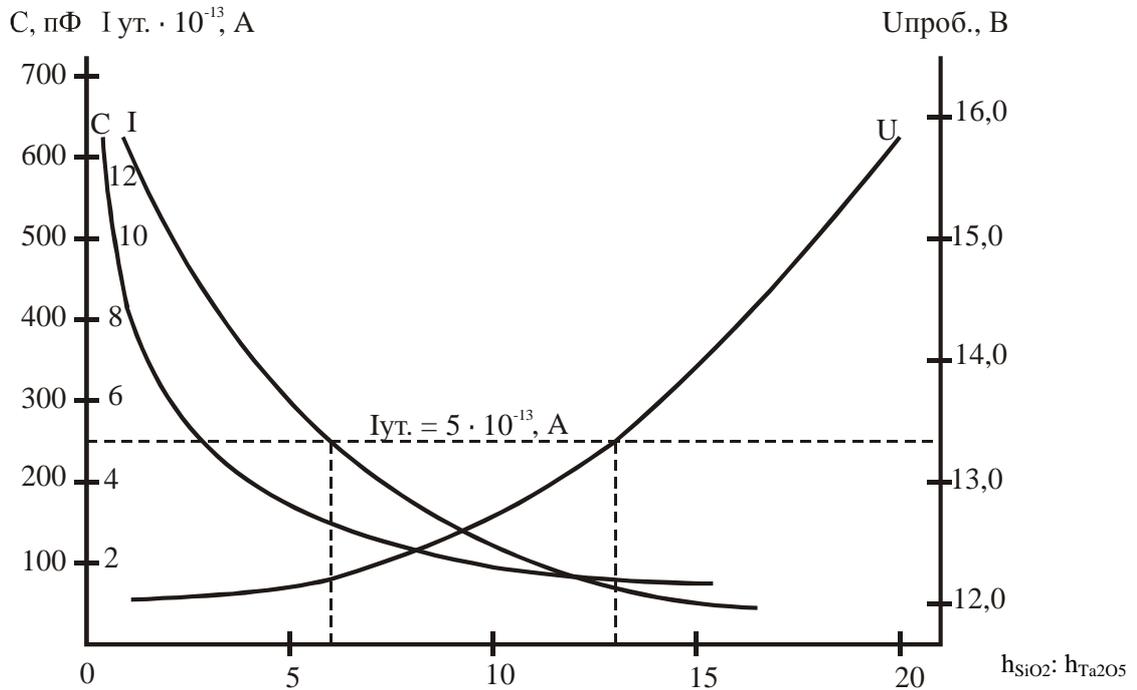


Рис.1 Зависимость значений C , $I_{ут}$, $U_{проб}$ конденсаторов от толщины диэлектриков

Пробивные напряжения конденсаторного диэлектрика измерялись на уровне тока 10 мкА при положительном напряжении на верхней обкладке конденсаторной структуры. Значения пробивных напряжений существенно не различаются для конденсатора с однослойным и двухслойным конденсаторным диэлектриком. Однако наблюдается снижение величины пробивного напряжения с ростом толщины пленки Ta_2O_5 , (рис. 1), и минимальные значения имеют место для соотношений $h_{Ta_2O_5}:h_{SiO_2}=80:20$ нм. Это снижение вызвано, очевидно, увеличением дефектности для более толстых пленок оксида тантала.

Необходимо подчеркнуть, что на тестовых конденсаторах, кроме конденсаторов с соотношением $h_{Ta_2O_5}:h_{SiO_2}=80:20$ нм, выполняется условие, обычно предъявляемое к электрической прочности конденсаторного диэлектрика: напряжение пробоя не должно быть меньше удвоенного напряжения питания схемы $U_{проб} \geq 2E_{пит}$ (при $E_{пит}=5$ В).

Таким образом, исследование параметров тестовых конденсаторов показывает, что конденсаторы с максимальным значением толщины пленки Ta_2O_5 в комбинированном диэлектрике имеют максимальное значение величины емкости, но при этом у них отмечены максимальные токи утечки и механическое напряжение, а также самые низкие значения пробивного напряжения. Конденсаторы с минимальным значением остаточных механических напряжений, т.е. с соотношением толщин $h_{Ta_2O_5}:h_{SiO_2}=10:90$ нм, имеют низкую электрическую емкость, но при этом достигаются низкие токи утечки и высокое значение пробивных напряжений. Оптимальными по своим электрофизическим параметрам являются конденсаторы с таким соотношением толщины слоев, при которых толщина пленки Ta_2O_5 составляет 20–40 % от общей толщины (рис. 1). Анализ зависимости изменения радиуса кривизны структуры Si-SiO₂-Ta₂O₅ от соотношения толщины пленок диэлектриков указывает на то, что отличие в значениях механических напряжений пленок при содержании Ta_2O_5 порядка 20–40 % в общей толщине комбинированного диэлектрика и пленок, при которых механические напряжения практически отсутствуют, не является значительным [6].

В этом случае можно говорить о целесообразности использования комбинированного диэлектрика с пропорцией Ta_2O_5 20–40 % в структуре ячейки памяти интегральных схем. Именно в этом случае:

емкость конденсаторов превышает емкость конденсаторов такой же площади, но с однослойным диэлектриком SiO_2 в 1,5 раза;

токи утечки для различных типов конденсаторов существенно не отличаются;

пробивные напряжения конденсаторного диэлектрика разных типов конденсаторов также не имеют существенных различий и удовлетворяют требованиям создания конденсаторных диэлектриков для СБИС;

конденсаторный диэлектрик с соотношением толщины Ta_2O_5 от общей толщины 20–40 % удовлетворяет требованиям минимизации механических напряжений в двухслойном диэлектрике.

Результаты и их обсуждение

Результаты изучения параметров тестовых конденсаторов с диэлектриком на основе оксида тантала были использованы при изготовлении экспериментальной партии ИМС. В МОП-конденсаторе при промышленном опробовании традиционный диэлектрик SiO_2 был заменен на разработанный TaO_5/SiO_2 . Площадь конденсатора в базовом варианте составляла $2,3 \cdot 10^6$ мкм², емкость равнялась 6,76 пФ. Использование конденсаторного диэлектрика TaO_5/SiO_2 позволило сократить площадь конденсатора, не меняя его емкостных характеристик, до значения $1,6 \cdot 10^6$ мкм². На рис. 2,а приведена фотография топологии кристаллов ИМС с конденсатором, в котором в качестве диэлектрика используется оксид кремния, а на рис. 2,б — фотография топологии с новым уменьшенным конденсатором.

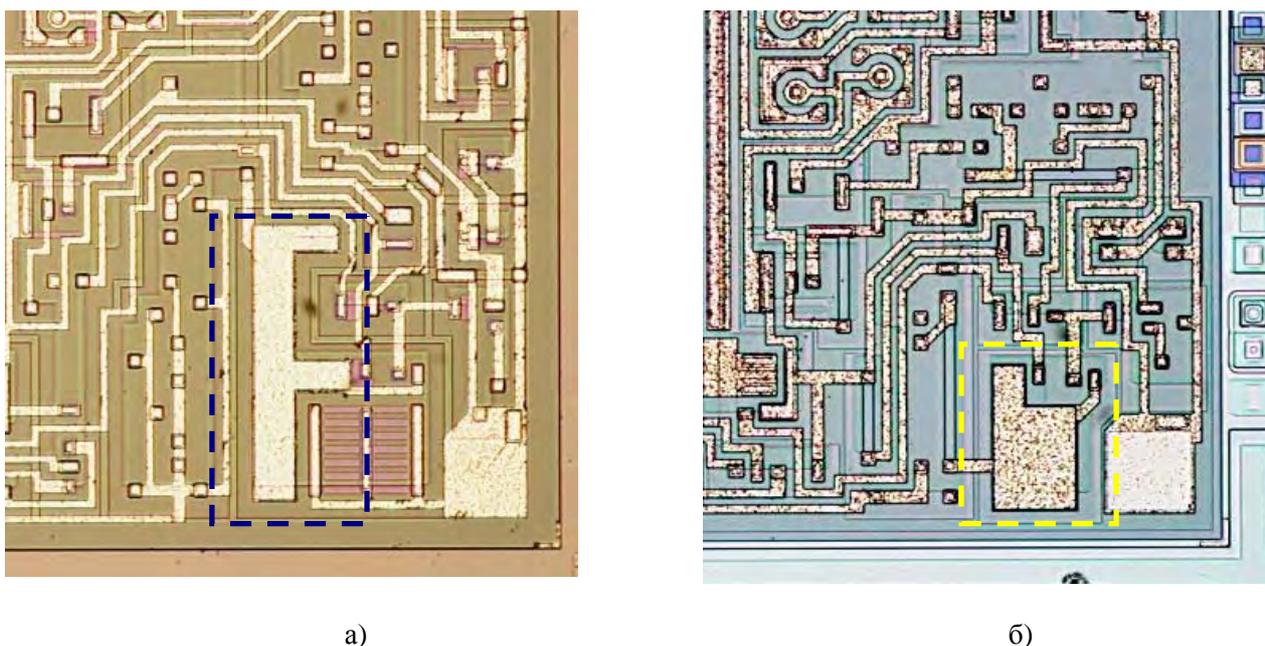


Рис. 2. Фотографии фрагментов топологии кристаллов ИМС с конденсатором базовым (а) и разработанным (б). Пунктирной линией выделен конденсатор

Уменьшение площади конденсатора привело к существенному изменению размера кристалла. В базовом варианте размер кристалла составлял $1,0 \times 1,2$ мм², а с использованием нового конденсатора размер микросхемы уже составил $0,9 \times 1,0$ мм². Таким образом, достигнуто сокращение площади на 25 %.

Заключение

Полученные результаты показывают, что разработанный конденсаторный диэлектрик на основе оксида тантала, прошедший промышленное опробование, по своим электрофизическим

характеристикам удовлетворяет требованиям производства элементов памяти интегральных схем и способствует повышению степени интеграции.

EFFECTIVE MOS-CAPASITORS FOR SUBMICRON VLSIS APPLICATIONS

T. PETLITZKAYA

Abstract

Main properties of MOS-capasitors on the basis $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ have been investegated. The dependence of effective installed charge in Ta_2O_5 thin film on wafer radius has been obtained. Test capasitors were created within VLSIs in standard industrial conditions.

Литература

1. *Shunji seki, Takashi Unagami, Bunjiro Tsujiyama* // J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and Technology. 1987. Vol. 131, № 11 P. 2621–2625.
2. *Yasushiro Nishuoka, Noriyuki Homma, Hiroshi Shinriki, et al.* // IEEE Trans. on Electron. Devices. 1987. Vol.ED-37. P.1957–1962.
3. *Chu A.K.* // J. Vac. Sci. and Technol. 2001. Vol.19, №4. P.1169–1172.
4. *Gottfried S., Chrlein* // Thin Solid Films. 1988. Vol.156, №2. P.207–229.
5. *Пилипенко В.А., Пономарь В. Н., Петлицкая Т.В.* // Инженерно-физический журнал. 2003. Т.76, №1. С.164–166.
6. *Пилипенко В.А., Пономарь В.Н., Петлицкая Т.В.* // Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. 2003. №2 С.30–33.
7. *Пилипенко В.А., Пономарь В.Н., Петлицкая Т.В.* // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. Физика, математика, информатика. 2003. №1. С.10–14.