

Д. т. н. В. А. ПИЛИПЕНКО, к. ф.-м. н. В. Н. ПОНОМАРЬ,  
Т. В. ПЕТЛИЦКАЯ

Беларусь, г. Минск, НПО "Интеграл"  
E-mail: belms@ belms.belpak.minsk.by

Дата поступления в редакцию  
15.07 2002 г. — 16.01 2003 г.

Оппоненты к. т. н. Г. Г. ЧИГИРЬ  
(НПО "Интеграл", г. Минск), к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК  
(Южноукр. пед. ун-т им. К. Д. Ушинского, г. Одесса)

## УЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОМБИНИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ СБИС

*Построена модель упругих напряжений в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Найдено оптимальное сочетание слоев, обеспечивающее ненапряженное состояние системы.*

Диэлектрики являются основным элементом конденсаторов интегральных схем, определяющим их параметры и свойства. Материал диэлектрика должен обладать высокой электрической прочностью, малыми диэлектрическими потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость [1].

Многослойные диэлектрики, благодаря возможности усиления преимуществ одного диэлектрика в комбинации с другим и многовариантности таких комбинаций, становятся предпочтительными в конструировании и технологии производства быстродействующих элементов памяти [2]. Особого внимания заслуживают пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в комбинации с другими диэлектриками. Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> имеет диэлектрическую проницаемость 21—27, достаточно большую ширину запрещенной зоны (4,2 эВ), электрическую прочность 6·10<sup>6</sup> В/см. Кроме того, установлена хорошая воспроизводимость процессов формирования Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и сочетаемость с SiO<sub>2</sub> [3]. Такие характеристики пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> привлекают разработчиков интегральных схем. Вместе с тем успешное применение комбинированного диэлектрика Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> требует дополнительного изучения ряда вопросов, в числе которых особого внимания заслуживают остаточные механические напряжения в многослойных тонкопленочных системах.

В работе были исследованы механические напряжения в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Для этого на образцах с различным набором толщин пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> методом рентгеновской дифракции измерялся радиус кривизны пластин (рис. 1). Из графиков видно, что с ростом толщины Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при постоянном значении SiO<sub>2</sub> кривизна системы меняется.

Температурный коэффициент расширения (ТКР) кремния равен 4,8·10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>, ТКР SiO<sub>2</sub> составляет 0,5·10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>, а ТКР Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — больше и равен 7,2·10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup>. Поэтому знаки возникающих напряжений в системах Si—SiO<sub>2</sub> и Si—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> имеют противоположные значения. В связи с этим можно предположить, что имеется некоторое оптимальное соотношение толщин слоев SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при которых радиус кривизны системы Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> стремится

к бесконечности, а кривизна системы становится равной нулю, т. е. система будет находиться в ненапряженном состоянии.

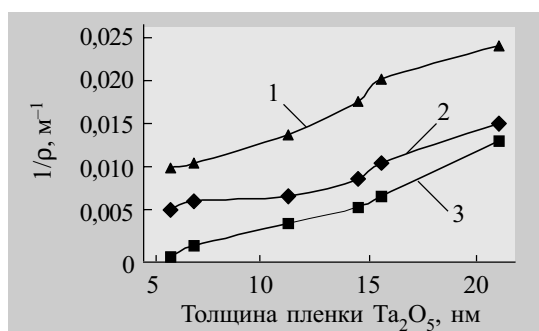


Рис. 1. Экспериментальная зависимость изменения кривизны системы Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от толщины пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при различных значениях толщины пленки SiO<sub>2</sub>:  
1 — 100 нм; 2 — 40 нм; 3 — 80 нм

Перейдем к построению модели упругих напряжений в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

При выводе уравнения изгиба системы будем считать, что основной вклад в изгиб вносят процессы осаждения SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, что позволяет применять к кремниевым структурам теорию изгиба трехслойных структур. При этом сделаны следующие предположения:

- каждый слой хорошо связан с другими слоями системы;
- толщины слоев и всей трехслойной системы гораздо меньше линейных размеров образца;
- каждый слой находится в состоянии плоского напряжения, и модули Юнга слоев не стремятся к нулю;
- пластина деформируется по сфере, сечения остаются плоскими;
- деформации в монокристаллическом кремнии, двуокиси кремния и оксиде тантала, в основном, определяются термическими напряжениями;
- деформация каждого слоя является упругой, т. е. релаксация напряжений отсутствует.

Существуют два условия равновесия для всех внутренних сил, действующих на поперечное сечение трехслойной системы:

- 1) сумма всех нормальных сил к сечению пластины равна нулю;
- 2) сумма моментов всех нормальных сил относительно граничного слоя равна нулю [4]:

$$\frac{E_1}{1-\nu_1} \int_0^{h_1} (\epsilon_0 - \Delta_1 + \frac{y}{\rho}) dy + \frac{E_2}{1-\nu_2} \int_0^{-h_2} (\epsilon_0 - \Delta_2 + \frac{y}{\rho}) dy + \frac{E_3}{1-\nu_3} \int_{-h_2}^{-(h_2+h_3)} (\epsilon_0 - \Delta_3 + \frac{y}{\rho}) dy = 0; \quad (1)$$

$$\frac{E_1}{1-\nu_1} \int_0^{h_1} (\epsilon_0 - \Delta_1 + \frac{y}{\rho}) y dy + \frac{E_2}{1-\nu_2} \int_0^{-h_2} (\epsilon_0 - \Delta_2 + \frac{y}{\rho}) y dy + \frac{E_3}{1-\nu_3} \int_{-h_2}^{-(h_2+h_3)} (\epsilon_0 - \Delta_3 + \frac{y}{\rho}) y dy = 0, \quad (2)$$

где  $E_1, E_2, E_3$  — модуль Юнга для Si, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, соответственно;  
 $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  — коэффициент Пуассона для Si, SiO<sub>2</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, соответственно;

- $h_1$  — толщина кремниевой подложки;
- $\epsilon_0$  — деформация граничного слоя;
- $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  — температурная усадка слоя,  $\Delta_i = \alpha_i T_i$ ;
- $\alpha_i$  — коэффициент линейного расширения  $i$ -го слоя;
- $T_i$  — температура формирования  $i$ -го слоя;
- $y$  — параметр интегрирования толщины пленки;
- $\rho$  — радиус кривизны всей системы;
- $h_2$  — толщина пленки SiO<sub>2</sub>;
- $h_3$  — толщина пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

После интегрирования и с учетом, что  $h_2$  и  $h_3$  значительно меньше  $h_1$ , получаем упрощенную формулу для расчета радиуса кривизны подложки:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6}{h_1} \left[ \frac{E_2 h_2 (1 - \nu_1) (\Delta_1 - \Delta_2)}{E_1 h_1 (1 - \nu_2)} + \frac{E_3 h_3 (1 - \nu_1) (\Delta_1 - \Delta_3)}{E_1 h_1 (1 - \nu_3)} \right]. \quad (3)$$

Представлял интерес расчет упругих постоянных пленки Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Для расчета коэффициентов  $E_3/(1-\nu_3)$  было использовано выражение (3) и полученные выше экспериментальные данные. Подставляя в формулу (3) поочередно значения  $\rho, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, h_2, h_3$ , для всех исследованных сочетаний толщин слоев получили среднее значение  $E_3/(1-\nu_3)$ , которое составляет  $5,9 \cdot 10^{11}$  Па.

На рис. 2 представлен график зависимости кривизны системы Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от толщины пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Для установления оптимального соотношения толщин пленок SiO<sub>2</sub> и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, при которых кривизна пластины становится минимальной, воспользуемся ранее построенной моделью, описывающей зависимость

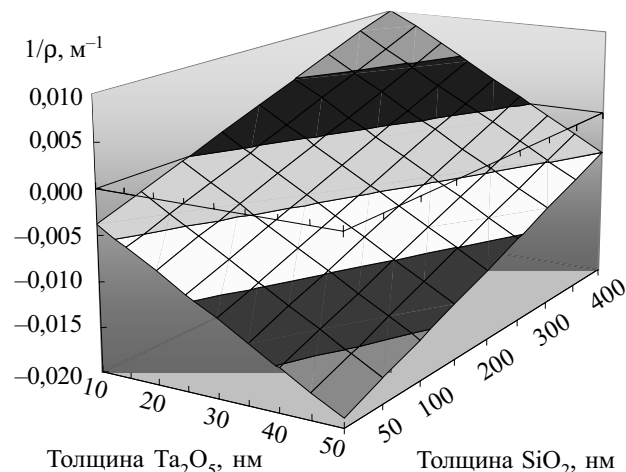


Рис. 2. Зависимость изменения кривизны системы Si — SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от толщины диэлектриков

радиуса кривизны от толщины пленок, т. е. выражением (3), но теперь левую часть выражения приравняем нулю. В результате преобразований и расчетов получаем, что при соотношении толщин пленок  $h_2/h_3=9,78$  система Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> находится в ненапряженном состоянии.

\*\*\*

Таким образом, как показали исследования, при использовании многослойных диэлектриков для изготовления конденсаторов СБИС могут учитываться (и регулироваться) остаточные механические напряжения в многослойных системах. Так, в системе Si—SiO<sub>2</sub>—Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> радиус кривизны пластины со сформированными диэлектриками будет стремиться к бесконечности, а сама кривизна — к нулю, если заложить в системе соотношение толщин пленок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SiO<sub>2</sub> как 1:10.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Горелик С. С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков.— М.: Металлургия, 1988.
2. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в микроэлектронике.— М.: Радио и связь, 1989.
3. Shunji Seki, Takashi Unagami, Bunjiro Tsujiyama. Electrical characteristics of the RF magnetron-sputtered tantalum pentoxide-silicon interface // J. Electrochem. Soc.: Solid-State Science and technology.— 1987.— Vol. 131, N 11.— P. 2621 — 2625.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости.— М.: Физмат, 1966.

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ПОДПИСЧИКОВ В РОССИИ

Редакция журнала  
 "Технология и конструирование в электронной аппаратуре"  
 сообщает, что на второе полугодие 2003 г.  
 подписка будет производиться по Объединенному каталогу  
 "Пресса России"  
 (подписной индекс 71141)