

УДК 621.3.049.77: 621.793

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК

аспирант Доан Т. Х.

Научный руководитель – канд. техн. наук Голосов Д. А.

Белорусский государственный университет информатики

и радиоэлектроники

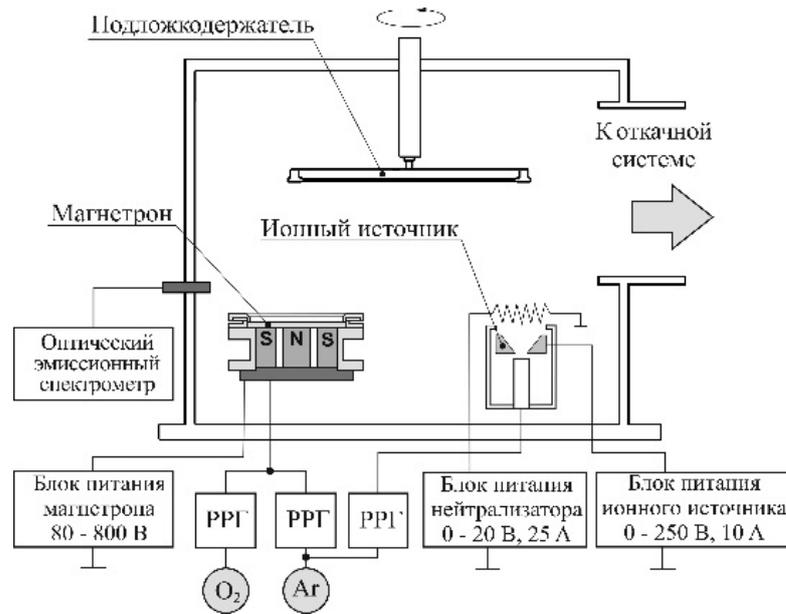
Минск, Беларусь

На протяжении всего развития микроэлектроники в качестве основного диэлектрика интегральных схем использовался оксид кремния SiO_2 . Однако дальнейшее использование SiO_2 имеет ряд ограничений, которые связаны с низкой диэлектрической проницаемостью этого материала ($\varepsilon \approx 3.9$). При переходе на новые технологические нормы геометрические размеры элементов металл – оксид – полупроводник (МОП) уменьшаются. Как результат, при технологических нормах 60 нм толщину подзатворного диэлектрика МОП транзисторов необходимо уменьшать до 1.2 нм [1]. При дальнейшем уменьшении толщины слоя SiO_2 его изоляционные свойства значительно ухудшаются вследствие резкого увеличения туннельных токов утечки. Поэтому, для перехода к меньшим технологическим нормам необходимо использовать материалы с более высокой диэлектрической проницаемостью (так называемые *high-k* диэлектрики), которые позволяют увеличить толщину подзатворного диэлектрика без ухудшения характеристик транзистора [2]. В качестве основных материалов для замены SiO_2 в МОП приборах первоначально рассматривались простые оксиды металлов, такие как оксиды гафния HfO_2 , циркония ZrO_2 , титана TiO_2 , алюминия Al_2O_3 , тантала Ta_2O_5 . Диэлектрическая проницаемость этой группы материалов обычно составляет $\varepsilon = 8 - 50$. Среди этих материалов TiO_2 имеет наибольшие значения диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 30 - 80$). Однако оксид титана имеет малую ширину запрещенной зоны ($E_g = 3.0 - 3.3$ эВ), обладает близким к нулю смещением зоны проводимости по отношению к Si, что приводит к высоким токам утечки. Кроме того, TiO_2 не обладает достаточной термической стабильностью, и кристаллизуется при низких температурах (~ 400 °С), что в свою очередь приводит к увеличению тока утечки по границам зерен. Это значительно ограничивает применимость TiO_2 в качестве подзатворного диэлектрика. С другой стороны, среди *high-k* диэлектриков Al_2O_3 обладает самой большой шириной запрещенной зоны ($E_g = 8.9$ эВ), и большим смещением зоны проводимости по отношению к Si, высокой температурной стабильностью (кристаллизуется при температурах более 900 °С). Главным недостатком оксида алюминия

является сравнительно низкое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 7 - 10$). Поэтому в последнее время с целью улучшения электрофизических свойств простых *high-k* диэлектриков стал актуален подход по их комбинированию в виде двойных оксидов [3]. Добавка оксида алюминия к оксиду титана, вероятно, может улучшить многие структурные и диэлектрические свойства пленок TiO_2 , такие как температура кристаллизации, качество пограничного слоя на границе с Si, ширина запрещенной зоны как следствие, уменьшить диэлектрические потери.

Одним из перспективных способов формирования пленок сложных оксидов является реактивное магнетронное распыление составных мишеней, т.е. мишеней, состоящих из матрицы одного металла со вставками других металлов [4]. Метод позволяет получать многокомпонентные пленки с произвольным количеством и содержанием элементов при использовании одного магнетрона. Однако практически отсутствуют публикации, в которых бы анализировались диэлектрические характеристики сложных оксидов, формируемых реактивным магнетронным распылением составных мишеней. Таким образом, целью работы было исследование диэлектрических характеристик пленок оксида титана-алюминия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления составной мишени.

Нанесение пленок оксида титана-алюминия производилось методом импульсного реактивного магнетронного распыления на установке магнетронного нанесения тонких пленок FERO-001 (рис. 1). Установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-1Б. Камера вакуумной установки оборудована магнетронной распылительной системой MAPC.011-80 с мишенью $\varnothing 80$ мм, ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя ЕНРМ.100.005 и вращаемым подложкодержателем. Для нанесения пленок состава $Ti_{0.8}Al_{0.2}O_y$ использовалась Ti-Al мишень, которая представляла собой Ti основу (99.5 % чистоты) $\varnothing 80$ мм и толщиной 5 мм в которую на $\varnothing 46$ мм впрессованы четыре цилиндрических Al вставки (99.9 % чистоты) $\varnothing 6$ мм. При этом расчетное соотношение Al/Ti в наносимых пленках должно было составлять 2:8.



РРГ – регулятор расхода газа

Рис 1. Схема установки магнетронного нанесения тонких пленок FERO-001

В ходе экспериментов подложки из монокристаллического кремния Si(100) *n*-типа устанавливались на подложкодержатель на расстоянии 120 мм от поверхности мишени магнетрона. Смещение оси подложкодержателя относительно оси магнетрона составляло 100 мм. Скорость вращения подложки 24,5 об/мин. Камера вакуумной установки откачивалась до давления 10^{-3} Па и производилась ионная очистка подложек. Для этого в ионный источник подавался Ag. Поток аргона составлял 20 мл/мин. Время очистки, напряжение и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли $t = 2$ мин, $U_d = 90$ В, $I_d = 6.0$ А, соответственно. Затем производилось нанесение пленок. Распыление Ti-Al мишени осуществлялось в Ar/O₂ смеси газов при содержании кислорода в Ar/O₂ смеси газов (G_{O_2}) от 0 до 46 % и общем расходе газов 60 мл/мин. Во всех экспериментах использовался режим стабилизации тока разряда магнетрона $I_t = 1.5$ А (частота следования импульсов $F = 10$ кГц, скважность 80 %).

Толщина нанесенных пленок определялась на оптическом интерферометрическом профилометре ПОИ-08. Диэлектрические характеристики пленок измерялись на тестовых МОП структурах. Для этого на оксидную пленку методом ионно-лучевого распыления через маску наносился верхний Ni электрод. Емкость, тангенс угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 25 Гц до 1.0 МГц получены с использованием измерителя иммитанса E7-20. Значения диэлектрической проницаемости рассчитывались исходя из толщины слоя диэлектрика и емкости конденсаторной структуры. Ширина запрещенной зоны пленок

определялась по краю собственного оптического поглощения. Для этого пленки наносились на подложки из оптического кварца. Спектры пропускания в диапазоне 200 – 900 нм получены с помощью спектрофотометра Проскан МС-121.

Проведены исследования влияния параметров процесса реактивного магнетронного распыления на диэлектрические характеристики (диэлектрическую проницаемость ϵ , тангенс угла диэлектрических потерь $tg\varphi$, ширину запрещенной зоны E_g) пленок $Ti_{0.8}Al_{0.2}O_y$. На рис. 2 представлены зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов.

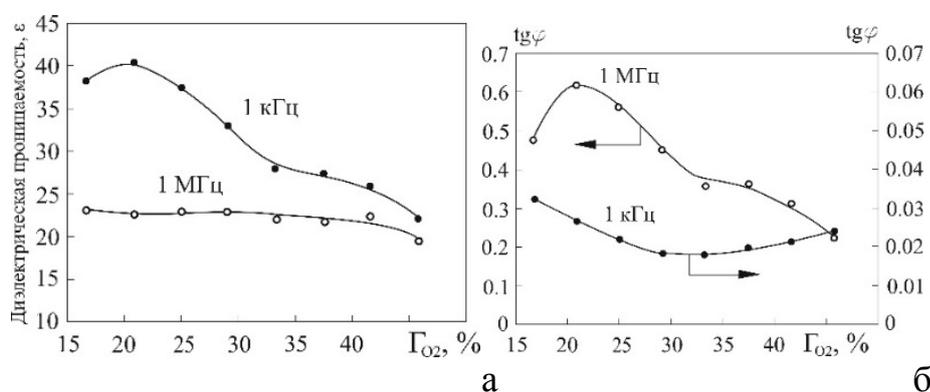


Рис 2. Зависимость диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пленок $Ti_{0.8}Al_{0.2}O_y$ от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Анализ частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь показал, что ϵ и $tg\varphi$ пленок $Ti_{0.8}Al_{0.2}O_y$ имеют сильную зависимость от частоты. При увеличении частоты от 25 Гц до 1.0 МГц ϵ монотонно снижалась, а $tg\varphi$ увеличивался. Снижение ϵ составляло до двух раз, и особенно было выражено для образцов, нанесенных при низкой концентрации кислорода и имеющих высокие значения диэлектрических потерь на высоких частотах. Наблюдаемое в экспериментах монотонное уменьшение диэлектрической проницаемости и увеличение потерь свидетельствует о релаксационной дисперсии в диэлектрике [5]. При увеличении Γ_{O_2} отмечалось снижение диэлектрической проницаемости на низких частотах, и уменьшение $tg\varphi$ на высоких частотах, что приводило к уменьшению дисперсии частотных характеристик.

На рис. 3 представлена зависимость E_g от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Как видно из рисунка при изменении Γ_{O_2} ширина запрещенной зоны изменялась в небольших пределах, от 3.87 до 3.94 эВ.

Это превышает значения E_g кристаллических фаз TiO_2 (E_g для анатаза составляет 3.18 эВ, брукита – 3.27 эВ, рутила – 3.03 эВ) [6].

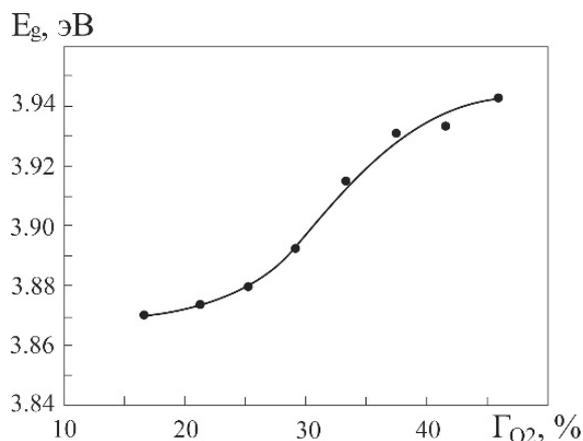


Рис 3. Зависимость ширины запрещенной зоны пленок $\text{Ti}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_y$ от концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов

Анализ полученных результатов показывает, что при распылении составной Ti-Al мишени могут быть получены пленки оксида титана-алюминия с ε от 20 до 40, $\text{tg}\varphi$ около 0.02 на частоте 1 кГц и $E_g = 3.87 - 3.94$ эВ. Сравнение диэлектрических характеристик пленок $\text{Ti}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_y$ с пленками TiO_y , нанесенными методом реактивного магнетронного распыления [7] показывает, что добавка Al приводит к снижению значений диэлектрической проницаемости, однако ε меньше зависит от Γ_{O_2} (для пленок TiO_y ε изменялась от 12 до 85). Также легирование Al приводит к небольшому увеличению E_g . Так ширина запрещенной зоны пленок TiO_y составляла 3.7 – 3.82 эВ [7]. Тангенс угла диэлектрических потерь практически не изменяется.

Литература

1. Hall, S. Review and perspective of high-k dielectrics on silicon / S. Hall, O. Buiu, I.Z. Mitrovic, Y. Lu, W.M. Davey // J. of Telecommunications and Information Technology. – 2007. – Vol. 2. – p. 33-43.
2. Robertson, J., High-K materials and metal gates for CMOS applications / J. Robertson, R.M. Wallace // Materials Science and Engineering R. – 2015. – Vol. 88. – p. 1–41.
3. Kim, Y.S. Nanolaminated Al_2O_3 - TiO_2 thin films grown by atomic layer deposition / Kim Y.S., Yun S.J. // J. Cryst. Growth. – 2005. – Vol. 274. – P. 3–4.
4. Nakano, J. Thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia thin films prepared by magnetron sputtering / J. Nakano, H. Miyazaki, T. Kimura, T. Goto, S. Zhang // J. Ceram. Soc. of Jap. – 2004. – Vol. 112. – p. S908-S911.

5. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа. 1986. – 368 с.

6. Li, J.-G. Anatase, brookite, and rutile nanocrystals via redox reactions under mild hydrothermal conditions: phase-selective synthesis and physicochemical properties / J.-G. Li, T. Ishigaki, X. Sun // J. Phys. Chem. C. – 2007. – Vol. 111. – P. 4969–4976.

7. Вилья, Н. Формирование пленок оксида титана методом реактивного магнетронного распыления / Н. Вилья, Д.А. Голосов, Т.Д. Нгуен // Доклады БГУИР. – 2019. № 5 (123). С. 87–93.