

УДК 539.216.2

## ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР Ni/HfO<sub>2</sub>/Ni

ТЕЛЕШ Е. В., ЗЫРЯНОВА А. С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: eteleash@mail.ru

**Аннотация.** Исследовано влияние состава рабочего газа и температуры подложки на частотную дисперсию электрофизических характеристик тонкопленочных структур Ni/HfO<sub>2</sub>/Ni, полученных реактивным ионно-лучевым распылением металлической мишени. Установлено повышение диэлектрической проницаемости и потерь при частоте выше 400 кГц, что можно связать с недостаточным окислением гафния и образованием кислородных вакансий в пленке диоксида гафния. Повышение температуры подложки способствовало значительному росту величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при частотах 20–40 кГц. При увеличении частоты внешнего поля до 100 кГц наблюдалось резкое снижение уровня  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ .

**Abstract.** The effect of the composition of the working gas and the substrate temperature on the frequency dispersion of the electrophysical characteristics of thin-film Ni/HfO<sub>2</sub>/Ni structures obtained by reactive ion-beam sputtering of a metal target is investigated. An increase in the dielectric constant and losses at a frequency above 400 kHz was established, which can be associated with insufficient oxidation of hafnium and the formation of oxygen vacancies in the hafnium dioxide film. An increase in the substrate temperature promoted a significant increase in the dielectric constant and dielectric loss tangent at frequencies of 20 – 40 kHz. With an increase in the frequency of the external field to 100 kHz, a sharp decrease in the level of  $\text{tg}\delta$  and  $\epsilon$  was observed.

В настоящее время вопросы получения и последующего исследования тонких пленок оксида гафния становятся более актуальными, что связано с рядом отличительных свойств данного материала, а именно высокой температурой плавления ( $T=3050$  К), прочностью, хорошими оптическими и диэлектрическими характеристиками, сохраняющимися в широком интервале температур [1]. Спектр свойств диоксида гафния HfO<sub>2</sub> обуславливает его применение во многих областях науки и техники. При равной удельной емкости такие диэлектрики гораздо толще и, соответственно, имеют существенно более низкие уровни туннельных токов утечки. Поэтому в микроэлектронике на сегодняшний день этот материал является наиболее перспективным high-k диэлектриком для замены традиционного применяемого диоксида кремния SiO<sub>2</sub> в МДП транзисторах (рис.1) [2]. Кроме того, HfO<sub>2</sub> термодинамически стабилен в контакте с кремниевой поверхностью, что крайне важно для подзатворного диэлектрика. Его диэлектрические свойства зависят от диэлектрической проницаемости и ширины запрещенной зоны диэлектриков. В реальных условиях диэлектрические свойства также зависят от толщины слоя диэлектрика, его пористости, наличия примесных атомов, фазового состояния и других факторов. То есть на диэлектрические свойства в значительной степени влияет метод получения диэлектрического слоя.

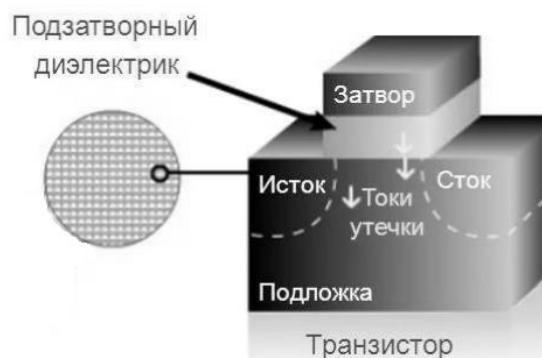
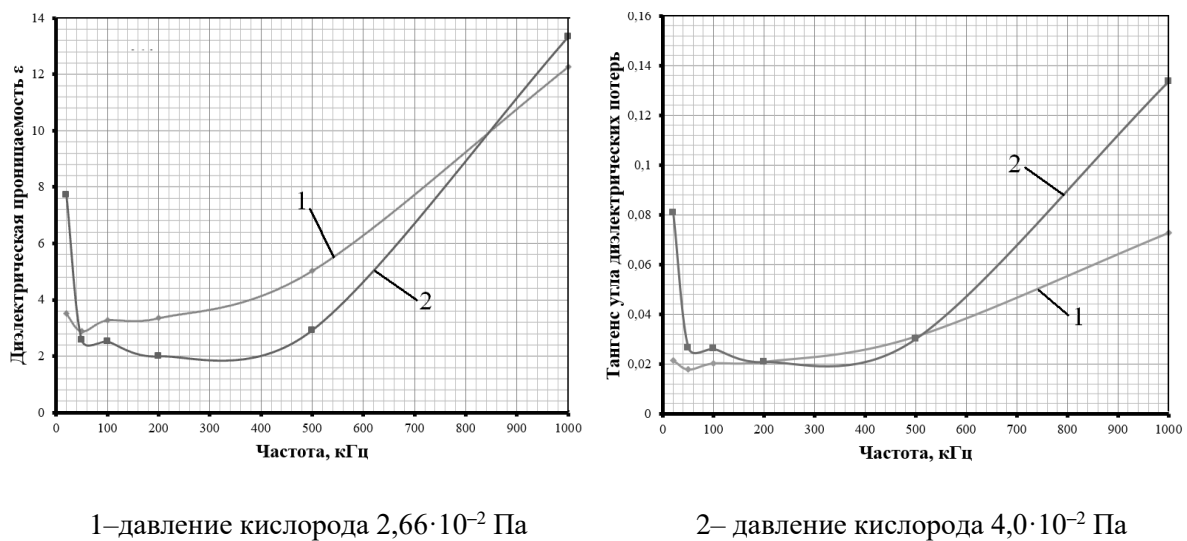


Рис. 1. Схема МДП транзистора

В работе [3] были исследованы транспортные свойства тонких плёнок  $\text{HfO}_{2-x}$  с нестехиометрическим составом. Наиболее простым способом измерения диэлектрической проницаемости является метод измерения ёмкости плоского конденсатора, изготовленного с использованием исследуемого диэлектрического слоя между двумя электродами. Частотная зависимость ёмкости тонкопленочных структур «металл/ $\text{HfO}_{2-x}$ /металл» в диапазоне частот от 1 до  $10^3$  кГц и при комнатной температуре показала уменьшение ёмкости и, соответственно, диэлектрической проницаемости структур. Авторы отмечают, что, хотя диэлектрические характеристики удовлетворительно описываются в рамках соотношений Дебая, дефекты кислородных вакансий в объёме материала при высоких температурах вносят существенных вклад в электропроводность плёнок.

Задачей настоящей работы являлось исследование влияния частоты внешнего поля на диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  тонкопленочных структур металл/ $\text{HfO}_2$ /металл. Формирование пленок  $\text{HfO}_2$  осуществляли реактивным ионно-лучевым распылением мишени из гафния. В качестве рабочих газов использовались аргон газообразный, чистый марки «А», ГОСТ 10157-73 и кислород ГОСТ 6331-78. В качестве материала мишени использовался металлический гафний марки ГФИ-1 ГОСТ 22517-77. Электрофизические параметры пленок (диэлектрическая постоянная  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ) определялись путем измерения характеристик структуры металл/диэлектрик/металл. Металлические контакты диаметром 300 мкм формировались путем ионно-лучевого напыления через маску пленки никеля толщиной  $\sim 0,3$  мкм. Ёмкость и  $\text{tg}\delta$  данной структуры измеряли с помощью измерителя иммитанса E7-20 в диапазоне частот от 20 кГц до 1 МГц.

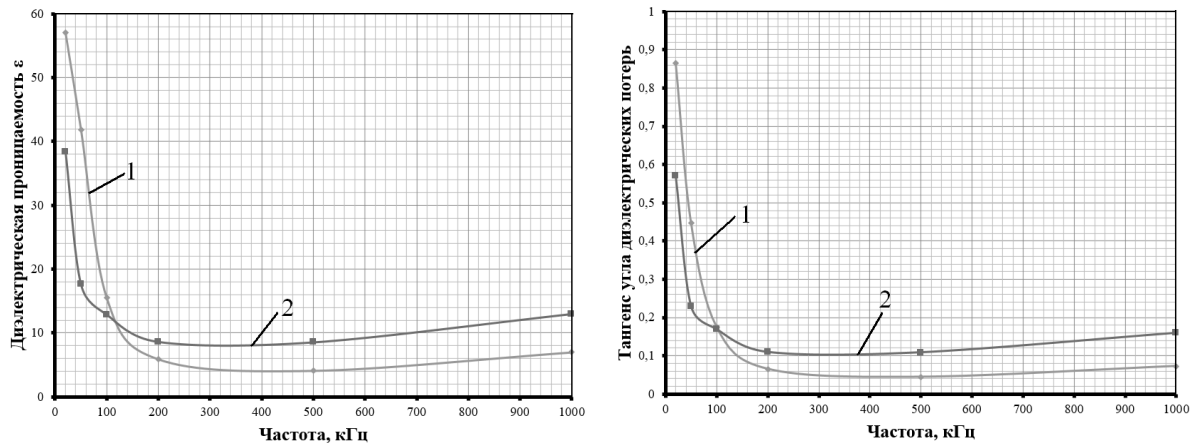
На рис. 2. представлены частотные зависимости электрофизических параметров структур  $\text{Ni}/\text{HfO}_2/\text{Ni}$ , сформированных при разных парциальных давлениях кислорода в рабочем газе. Температура подложки составляла  $\sim 313$  К.



**Рис. 2.** Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь структур от частоты внешнего поля и от парциального давления кислорода

Наблюдалось снижение  $\epsilon$  почти в 4 раза при частоте 300 кГц у структур, полученных при давлении кислорода  $4,0 \cdot 10^{-2}$  Па. Повышение диэлектрической проницаемости и потерь при частоте выше 400 кГц можно связать с недостаточным окислением гафния и образованием кислородных вакансий в пленке диоксида гафния. В диэлектрике, находящемся в постоянном электрическом поле, потери определяются только током сквозной проводимости. При низких частотах величина  $\text{tg}\delta$  определяется, в основном, током сквозной проводимости. С увеличением частоты реактивное ёмкостное сопротивление уменьшается пропорционально частоте. Поэтому растёт реактивный ток, и, следовательно,  $\text{tg}\delta$ . При некоторой частоте релаксационные процессы начинают отставать от изменения внешнего поля. В результате появляется поляризационный активный ток, растущий пропорционально квадрату частоты. Это приводит к увеличению потерь и росту  $\text{tg}\delta$ .

Повышение температуры подложки способствовало значительному росту величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при частотах 20–40 кГц (рис.3). Парциальное давление кислорода составляло  $4,0 \cdot 10^{-2}$  Па.



1–температура подложки 388 К

2– температура подложки 488 К

**Рис. 3.** Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь структур от частоты внешнего поля и от температуры подложки

При увеличении частоты внешнего поля до 100 кГц наблюдалось резкое снижение уровня  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ . Это уменьшение означает, что поляризованность (поверхностная плотность связанного заряда) понижается. Уменьшение значения  $\epsilon$  при увеличении частоты внешнего поля объясняется тем, что некоторые виды поляризации не успевают установиться, т. е. время их релаксации существенно больше, чем период колебаний поля. Известно, что повышение частоты приводит к «выключению» составляющих поляризуемости молекул  $\text{HfO}_2$ . Сначала исчезает ориентационная поляризуемость, а затем и ядерная. При дальнейшем увеличении частоты один из релаксационных видов поляризации, если их много, перестаёт успевать следовать за изменением внешнего поля. Следовательно, этот вид поляризации исчезает,  $\text{tg}\delta$  также уменьшается.

#### Список использованных источников

1. Wang, J. Review. Hafnia and hafnia-toughened ceramics [text] / J. Wang, H. P. Li, R. Stevens // J. Mater. Sci. – 1992. – Vol. 27., № 20. – P. 5397-5430.
2. Huang, A. P. Hafnium based high k gate dielectrics / A. P. Huang, Z.C. Yang, P. K. Chu; Ed. by: P. K. Chu // Advances in Solid State Circuits Technologies. – 2010. – P. 333–350.
3. He, J. Q. Microstructure and interfaces of  $\text{HfO}_2$  thin films grown on silicon substrates [text] / J. Q. He, A. Teren, C. L. Jia, P. Ehrhart, K. Urban, R. Waser, R. H. Wang // J. Cryst. Growth. – 2004. – Vol. 262., № 1-4. P. 295-303.