

**А. С. Зырянова**  
(БГУИР, Минск)

Науч. рук. **Е. В. Телеш**, ст. преподаватель

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ГАФНИЯ**

Оксид гафния ( $\text{HfO}_2$ ) является высокотемпературным огнеупорным материалом с отличительными физическими и химическими свойствами, которые обеспечивают его применение для широкого спектра технологических приложений. Наибольший интерес представляют структуры на основе  $\text{HfO}_2$ , который, по сравнению с традиционно используемым диоксидом кремния, обладает высокими значениями диэлектрической постоянной ( $\epsilon_{\text{HfO}_2} = 16\text{--}25$ ), ширины запрещенной зоны (8,0–5,7 эВ), коэффициента преломления (1,8–2,2). Также  $\text{HfO}_2$  является прозрачным в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения, что делает его перспективным оптическим материалом [1]. Обладая термической и химической устойчивостью,  $\text{HfO}_2$  термодинамически стабилен в контакте с кремниевой поверхностью, что крайне важно для подзатворного диэлектрика. При термообработке при 770 К на воздухе происходит кристаллизация аморфных пленок  $\text{HfO}_2$  с образованием моноклинной кристаллической решетки [2].

Формирование пленок  $\text{HfO}_2$  осуществляли реактивным ионно-лучевым распылением металлической мишени. 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. Для подложек применялись кремний КДБ-10, кварц и оптическое стекло К8. Расстояние мишень-подложка составляло ~ 80 мм, остаточный вакуум составлял  $2,0 \cdot 10^{-3}$  Па. Спектры оптического пропускания и поглощения пленок  $\text{HfO}_2$  определялись при помощи спектрофотометра MC-121 PROSCAN в диапазоне 300...1000 нм. Электрофизические параметры пленок (диэлектрическая постоянная  $\epsilon$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ) определялись путем измерения характеристик структуры металл/ $\text{HfO}_2$ /кремний. Емкость и  $\text{tg}\delta$  данной структуры измеряли с помощью прибора E7-20 на частоте 1 МГц.

В таблице 1 приведены режимы формирования образцов структур. Термообработку структур  $\text{HfO}_2$ /кремний осуществляли на воздухе при температуре 653–663 К в течение 30 минут. Затем через металлическую маску наносились контакты из никеля.

Таблица 1 – Режимы формирования образцов

№ образца	$U_a$ , кВ	$I_m$ , мА	$P_{\text{Ar}}$ , $\text{Ч}10^{-2}\text{Па}$	$P_{\text{O}_2}$ , $\text{Ч}10^{-2}\text{Па}$	$T$ , К
1	3,0	70	6,65	1,72	303
2	3,1	80	6,60	3,99	303
3	3,0	80	6,65	3,99	523

На рисунках 1 и 2 представлены спектры пропускания пленок  $\text{HfO}_2$  до и после термообработки.

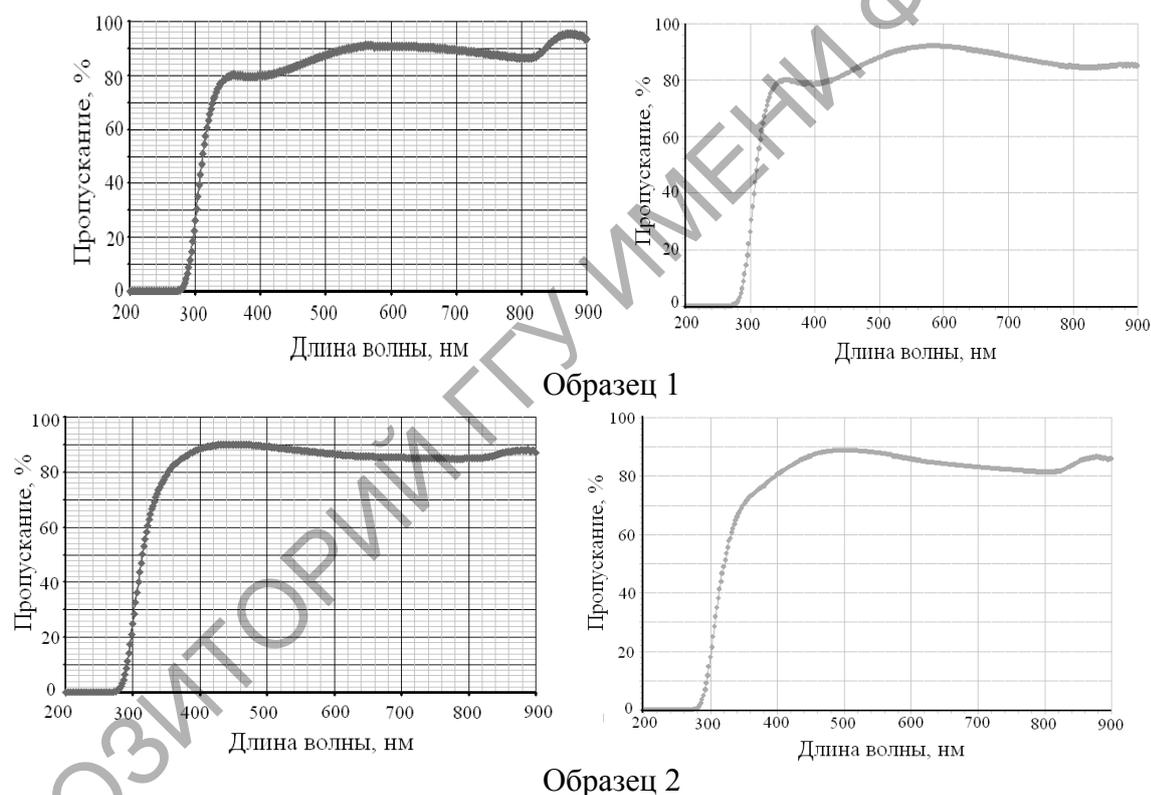
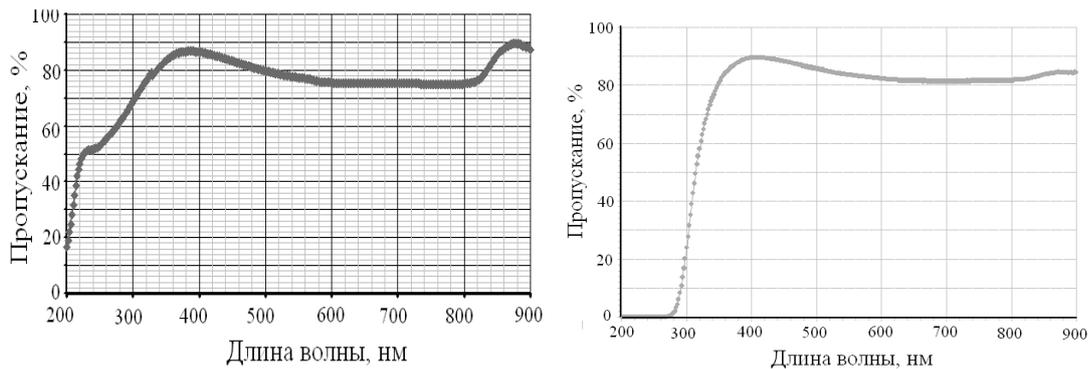


Рисунок 1 – Спектры пропускания пленок диоксида гафния до и после термической обработки (для образцов 1 и 2)

Установлено, что заметные изменения произошли только у образца 3 – существенно снизилось пропускание в УФ области спектра, но увеличилось в видимой и ИК области.



Образец 3

Рисунок 2 – Спектры пропускания пленок диоксида гафния до и после термической обработки (для образца 3)

В таблицах 2 и 3 приведены результаты измерений электрофизических и оптических характеристик структур до и после термообработки. Величины оптического пропускания  $T$  и поглощения  $\alpha$  измерялись на длине волны 555 нм.

Таблица 2 – Характеристики пленок  $\text{HfO}_2$  до термообработки

Показатели № обр.	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$T, \%$	$\alpha, \%$	$E_g, \text{эВ}$
1	6,1	0,50	80,3	0,046	5,6
2	7,5	0,35	93,0	0,030	5,8
3	7,6	0,26	92,0	0,095	4,4

Таблица 3 – Характеристики пленок  $\text{HfO}_2$  после термообработки

Показатели № обр.	$\epsilon$	$\text{tg}\delta$	$T, \%$	$\alpha, \%$	$E_g, \text{эВ}$
1	6,7	0,10	91,2	0,040	4,39
2	8,0	0,15	87,6	0,057	4,37
3	8,5	0,13	83,5	0,089	4,34

Термообработка привела к увеличению значений диэлектрической проницаемости и резкому снижению тангенса диэлектрических потерь. Оптические характеристики улучшились у образца 1. Отжиг привел к снижению пропускания у образцов 2 и 3. Установлено, что термообработка вызвала снижение ширины запрещенной зоны  $E_g$ , что может быть связано с появлением кристаллической структуры в пленке  $\text{HfO}_2$ .

## Литература

1. Khoshman, J. M. Amorphous hafnium oxide thin films for antireflection optical coatings / J. M. Khoshman, A. Khan, M. E. Kordesch // Surf. Coat. Technol. – 2008. – V. 202, № 11. – P. 2500–2502.

2. Багмут, А. Г. Фазовые превращения в пленках, осажденных лазерной абляцией Hf в атмосфере кислорода / А. Г. Багмут, И. А. Багмут, В. А. Жучков, М. О. Шевченко // Журнал технической физики, 2012.–Т. 82.–вып.6. – С. 122–126.

**И. В. Капцевич, А. Ю. Валюк, А. В. Струк**

(ГрГУ имени Я. Купалы, Гродно)

Науч. рук. **В. А. Струк**, д-р техн. наук, профессор

### **КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ**

В технологических процессах, используемых на предприятиях химической, горнодобывающей, перерабатывающей промышленности, теплоэнергетики и строительной индустрии, используют металлополимерные функциональные элементы, обеспечивающие устойчивую эксплуатацию оборудования, монтаж конструктивных составляющих для функционирования производственных, социальных и бытовых зданий и сооружений. К числу распространённых элементов подобного типа относят опознавательные и ограничительные столбики, металлополимерные ролики ленточных конвейеров и металлополимерные крепёжные элементы типа дюбель и адаптивных опор [1–3].

Использование в конструкциях роликов ленточных конвейеров функциональных элементов из полимерных и композиционных материалов позволяет не только расширить их номенклатуру с различными параметрами эксплуатационных характеристик, но и в ряде случаев достичь значимого технического эффекта вследствие снижения массы конструкции, увеличения параметров стойкости к коррозионно-механическому изнашиванию, технологичности изготовления, монтажа и обслуживания в действующих производственных циклах.

Разработана конструкция металлополимерного ролика ленточного конвейера для комплектации технологических линий по транспортированию сырьевых полуфабрикатов и продукции на предприятиях