

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК HfO₂

Зырянова А.С.

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

Научный руководитель: Телеш Е.В. – старший преподаватель

Аннотация. Проведено исследование влияния термического отжига при температуре 653–693 К на воздухе на оптические характеристики тонких пленок диоксида гафния, полученных реактивным ионно-лучевым распылением мишени из гафния. Установлено, что отжиг пленки, полученной при нагретой подложке, привел к снижению пропускания в УФ области спектра, увеличению – в видимой и ИК области и уменьшению поглощения во всем диапазоне измерений.

Ключевые слова: диоксид гафния, тонкие пленки, реактивное ионно-лучевое распыление, оптические характеристики, термический отжиг

Введение. Диоксид гафния обладает высокими значениями ширины запрещенной зоны (5,7–8,0 эВ), коэффициента преломления (1,8–2,2). Пленки HfO₂ демонстрируют высокую прозрачность в широкой спектральной области до E_g, при этом сохраняют свои оптические свойства при высоких температурах [1–2]. При термообработке при 770 К на воздухе происходит кристаллизация аморфных пленок HfO₂ с образованием моноклинной кристаллической решетки [3]. Пленки были получены лазерным испарением. Повышение температуры подложки способствовало формированию в пленке кристаллической фазы, представляющей собой тетрагональную и моноклинную модификацию HfO₂. Авторы работы [4] применяли быстрый термический отжиг структур HfO₂/кремний при температуре 773, 973 и 1073 К в атмосфере аргона и кислорода. Пленки диэлектрика были сформированы высокочастотным магнетронным распылением. В результате отжига пленки стали поликристаллическими. В вышеуказанных работах было исследовано влияние термического отжига на структурные и электрофизические характеристики пленок HfO₂, но не на оптические.

Данная статья посвящена изучению влияния термического отжига на воздухе на оптические пропускание и поглощение, а также на ширину запрещенной зоны тонких пленок диоксида гафния, полученных реактивным ионно-лучевым распылением при разных режимах.

Основная часть. Формирование пленок HfO₂ осуществляли реактивным ионно-лучевым распылением мишени из гафния марки ГФИ-1 ГОСТ 22517-77 [5]. В качестве рабочих газов использовались аргон газообразный, чистый марки «А», ГОСТ 10157-73 и кислород ГОСТ 6331-78. Для подложек применялись кварц и оптическое стекло К8. Спектры оптического пропускания и поглощения пленок HfO₂ определялись при помощи спектрофотометра MC-121 PROSCAN в диапазоне 300...900 нм. В таблице 1 приведены режимы формирования образцов структур. Термообработку структур HfO₂/кремний осуществляли на воздухе при температуре 653–663 К в течение 30 минут. На рисунке 1 представлены спектры пропускания пленок HfO₂ до и после термообработки.

Таблица 1 – Режимы формирования образцов

№ образца	U _a , кВ	I _m , мА	P _{Ar} , ×10 ⁻² Па	P _{O₂} , ×10 ⁻² 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

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

На рисунке 2 представлены спектры поглощения пленок до и после термообработки.

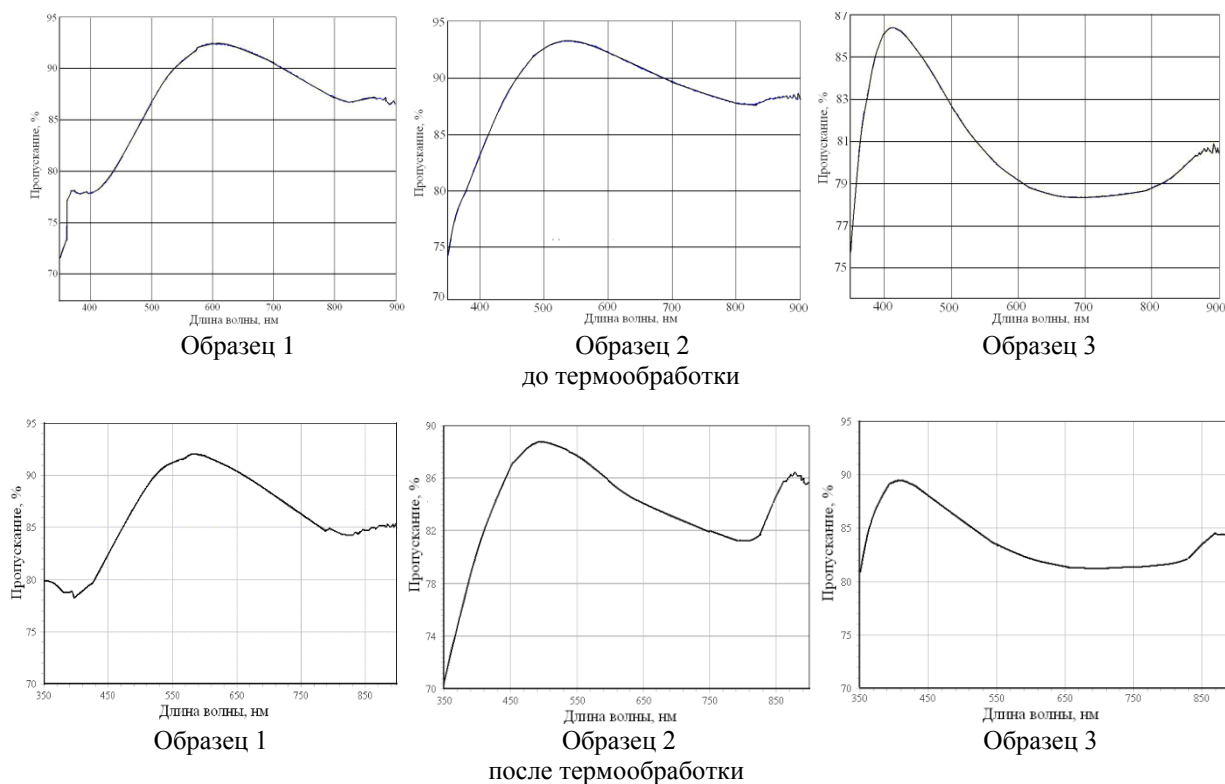


Рисунок 1 – Спектры пропускания пленок диоксида гафния до и после термической обработки

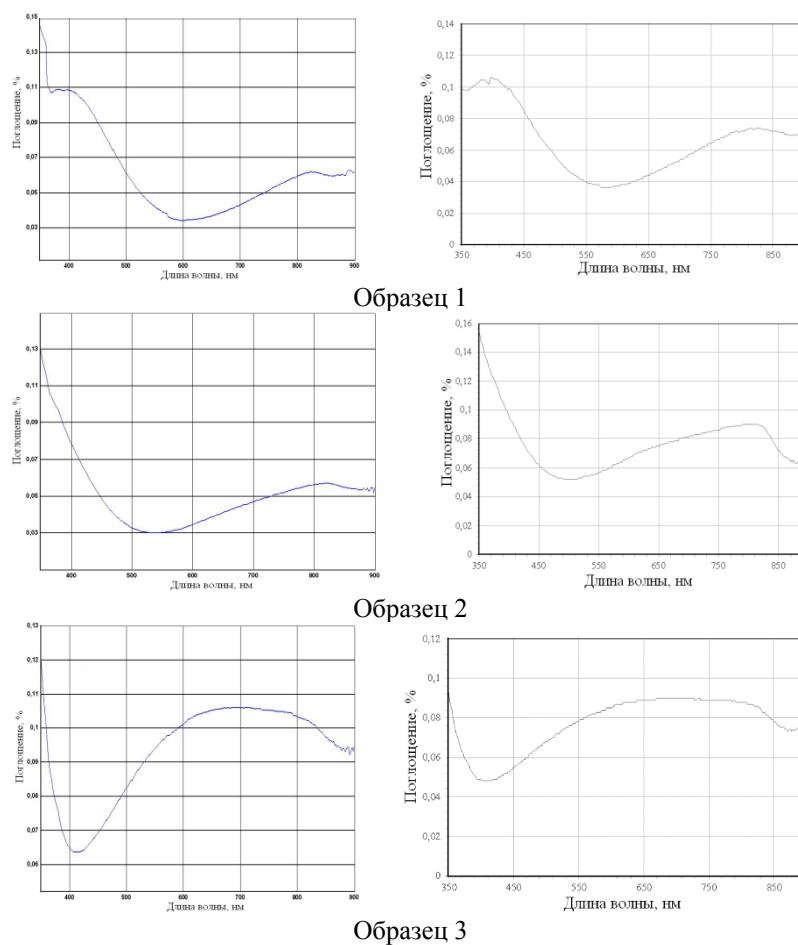


Рисунок 2 – Спектры поглощения пленок диоксида гафния до и после термической обработки

У образца 1 снизилось, а у образца 2 увеличилось поглощение в УФ диапазоне. В то же время наблюдался незначительный рост поглощения в видимом и ИК диапазоне. У образца 3, полученного при нагретой подложке термообработка привела к снижению поглощения во всем диапазоне измерений.

В таблице 2 приведены результаты измерений оптических характеристик структур до и после термообработки. Величины оптического пропускания T и поглощения α измерялись на длине волны 555 нм. Ширина запрещенной зоны определялась путем анализа спектров пропускания и поглощения пленок, нанесенных на подложки из кварца.

Таблица 2 – Оптические характеристики пленок HfO_2 до и после термообработки

№ образца	До термообработки			После термообработки		
	T , %	α , %	E_g , эВ	T , %	α , %	E_g , эВ
1	80,3	0,046	5,6	91,2	0,040	4,39
2	93,0	0,030	5,8	87,6	0,057	4,37
3	92,0	0,095	4,4	83,5	0,089	4,34

Термообработка привела к улучшению оптических характеристик 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 HfO_2 .

Заключение. Проведенные исследования показали, что термический отжиг пленок диоксида гафния, нанесенных на подложки из оптического стекла, привел к улучшению оптических характеристик только у образцов, полученных при низком парциальном давлении кислорода в рабочем газе и при нанесении пленок на горячую подложку. В процессе отжига происходило дополнительное окисление гафния и формирование кристаллической структуры, что способствовало росту пропускания и снижению поглощения в пленках HfO_2 .

Список литературы

1. Aarik, J. Optical characterization of HfO_2 thin films grown by atomic layer deposition / J. Aarik, H. Mandar, M. Kirm, L. Pung // *Thin Solid Films*. – 2004. – V. 466. – № 1–2. – P. 41–47.
2. Zhan, M.Q. Optical, structural and laser induced damage threshold properties of HfO_2 thin films prepared by electron beam evaporation / M.Q. Zhang et al. // *Chin. Phys. Lett.* – 2005. – V. 22. – № 5. – P. 1246–1248.
3. 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.
4. Рудаков, В.И. Формирование тонкопленочных структур HfO_2/Si (100) методом высокочастотного магнетронного распыления / В.И. Рудаков, и др. // *Микроэлектроника*, 2011. – Т. 40. – № 6. – С. 418–423.
5. Зырянова, А.С. Исследование электрофизических параметров тонкопленочных структур HfO_2/Si , полученных реактивным ионно-лучевым распылением / А. С. Зырянова, Е. В. Телеш // *Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / редкол.: В.Б. Оджаяев (отв. ред.) [и др.]*. – Минск: БГУ, 2020. – С. 51–55.

UDC 621.315.61–537.311.32

INFLUENCE OF THERMAL ANNEALING ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THIN HfO_2 FILMS

Zyrianova A.S.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus**Telesh E.V. – senior lecturer*

Annotation. The effect of thermal annealing at 653–693 K in air on the optical characteristics of thin films of hafnium dioxide obtained by reactive ion-beam sputtering of a hafnium target has been studied. It was found that annealing of the film obtained with a heated substrate led to a decrease in transmission in the UV region of the spectrum, an increase in the visible and IR regions, and a decrease in absorption in the entire measurement range.

Keywords. Hafnium dioxide, thin films, reactive ion-beam sputtering, optical characteristics, thermal annealing