

Структурные и оптические свойства тонких пленок оксида титана на полупроводниковых подложках

И. В. Ивашкевич

*Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, Могилёв, Беларусь;
e-mail: iivashkevich@yandex.by*

Проведены исследования в видимой области спектра оптических свойств пленок оксида титана и их зависимость от условий формирования пленок методом ВЧ магнетронного напыления. Сравнительный анализ рассчитанных спектров показателя преломления показал, что в значительной мере на ход дисперсионных кривых оказывает температура подложки. Увеличение температуры подложки приводило к увеличению показателя преломления пленки. Еще одним фактором, влияющим на оптические свойства пленок оксида титана, оказался состав газовой среды, в которой происходит распыление мишени. Увеличение процентного содержания аргона в газовой смеси приводит к уменьшению показателя преломления пленки. Установлено наличие неоднородного переходного слоя между кремниевой подложкой и пленкой оксида титана.

Ключевые слова: тонкопленочные покрытия, дисперсия оптических характеристик, спектральная эллипсометрия.

Введение

Тонкопленочные покрытия на основе оксидов металлов являются наиболее перспективными в области применения прозрачных электродов в оптоэлектронных устройствах. Одним из таких материалов является оксид титана, обладающий высокой прозрачностью в видимой области излучения и высокой электропроводностью.

Несмотря на то, что накоплен достаточно большой объем материалов по оптическим свойствам плёнок оксида титана (TiO_2), эти исследования продолжаются, что во многом связано с использованием в последнее время структурированных плёнок. Согласно результатам исследований [1–4], во многих случаях пленки TiO_2 оказываются двухфазными, когда при их формировании образуются слои кристаллитов оксида титана со структурой анатаза и со структурой рутила. Также различные режимы формирования пленок могут приводить к образованию пор, пленок нестехиометрического состава (TiO_x) и др. Информация о дисперсии оптических характеристик (показателя преломления n и показателя поглощения k) подобных пленок позволяет корректировать условия их формирования. Данная работа посвящена установлению взаимосвязи между структурными и оптическими характеристиками тонких пленок оксида титана и режимами их формирования.

Эксперимент

Для исследования лабораторией «Интегрированные микро и наностистемы» (БГУИР, Минск) были предоставлены несколько образцов пленок оксида титана на кремниевых подложках. Исследуемые пленки формировались методом ВЧ магнетронного напыления в условиях скользящего углового осаждения (GLAD) на подложки кремния КДБ-12 в газовой среде $\text{Ar}+\text{O}_2$. Условия формирования всех образцов указаны в табл. 1.

Для установления дисперсионных зависимостей показателей преломления и поглощения пленок оксида титана использовали метод спектральной эллипсометрии. Данный метод позволяет с большой точностью определять спектры оптических характеристик различных материалов и толщины слоев в многопленочных структурах в диапазоне от единиц до тысяч нанометров [5].

Табл. 1. – Условия формирования образцов № 1–5.

№ образца	Время распыления, мин	Мощность ВЧ магнетрона, Вт	Температура подложки, °С	Процентное соотношение Ag/O ₂	Давление, Па
1	1	100	25	80/20	1,1
	2	300			
	9	600			
2	1	100	25	60/40	1,22-1,27
	25	300			
3	1	100	250	80/20	1,14-1,17
	25	300			
4	1	100	250	60/40	1,22-1,27
	28	300			
5	1	100	250	70/30	1,15-1,19
	25	300			

На спектральном эллисометре ES-2 [6] были измерены спектры $\text{tg}\Psi(\lambda)$, $\text{cos}\Delta(\lambda)$ исследуемых пленок при углах падения света 60° , 65° и 70° в спектральном диапазоне 400–1000 нм. На рис. 1 представлены экспериментальные спектры образца № 5 (кривые 1–3).

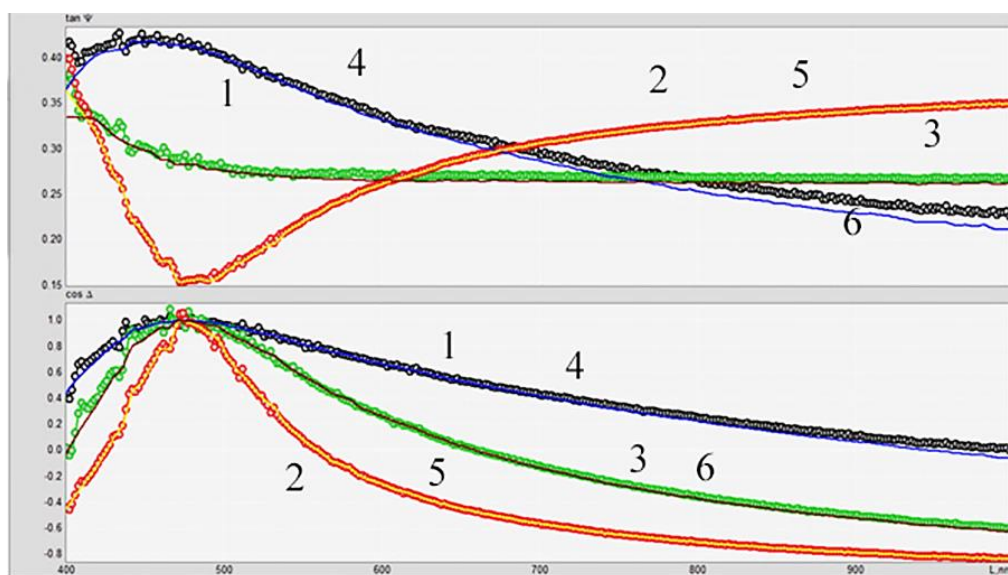


Рис. 1. – Измеренные (спектры 1-3) и рассчитанные (спектры 4-6) спектры $\text{tg}\Psi(\lambda)$ и $\text{cos}\Delta(\lambda)$ образца № 5 (1, 4 – при угле падения излучения 60° , 2, 5 – 65° , 3, 6 – 70°).

С целью определения дисперсии показателя преломления $n(\lambda)$ исследуемых пленок было получено решение обратной задачи спектральной эллисометрии (ОЗСЭ) в программном обеспечении Spel эллисометра ES-2 для однослойной модели полубесконечная подложка (n_s, k_s) – однородный слой (n, k, d). Результаты этого решения ОЗСЭ для всех 5 образцов представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Табл. 2. – Рассчитанные параметры пяти образцов пленок оксида титана.

Параметры	Значения				
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Образец №4	Образец №5
d , нм	24,3	32,1	41,9	40,5	47,7
<i>Deviation</i>	0,0251	0,0179	0,0423	0,0265	0,0346

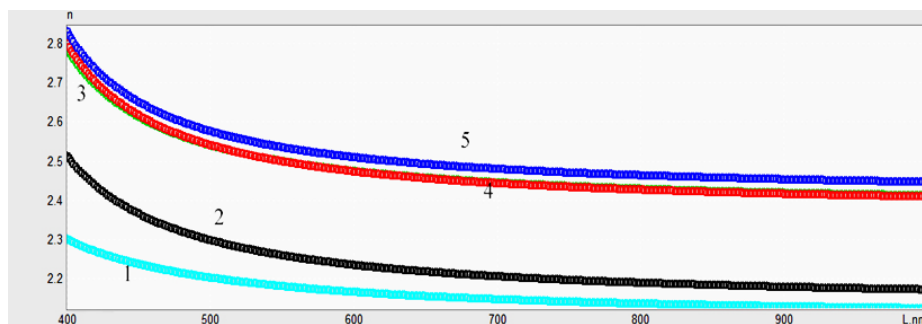


Рис. 2. – Рассчитанные спектры $n(\lambda)$ пленок оксида титана (номер спектра совпадает с номером образца).

Как уже упоминалось выше, оптические свойства пленок оксида титана напрямую зависят от условий и метода их формирования, как правило данные пленки имеют градиент показателя преломления по толщине и для описания их структуры в эллипсометрических исследованиях выбирают многослойную модель. С целью обнаружить подобный градиент n было получено решение ОЗСЭ для пятислойной модели. Каждый слой моделировался бинарным (модель Максвелла – Гарнетта) с различным процентным содержанием TiO_2 и SiO_2 .

Значения толщин этих слоев и процентное содержание компонент для образца № 5 приведены в табл. 3. Нумерация слоев ведется от подложки. Невязка измеренных и рассчитанных поляризационных углов в этом случае для всех пяти образцов составила $Deviation < 0,003$ (рис. 1, кривые 4-6).

Табл. 3. – Значения рассчитанных толщин слоев для пятислойной модели образца № 5.

№ слоя	Процентное соотношение $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ в слое	Толщина слоя, нм
1	0/100	3,4
2	25/75	5,8
3	50/50	6,4
4	75/25	2,3
5	100/0	32,7

Обсуждение результатов

Опираясь на полученные данные, можно сказать, что значение показателя преломления исследуемых пленок (рис. 2) оказалось значительно ниже, чем известные в литературе значения показателей преломления оксида титана [1, 7]. Сравнительный анализ спектров $n(\lambda)$ на рис. 2 показал, что в значительной мере на ход дисперсионных кривых оказывает температура подложки (спектры 3–5). Увеличение температуры подложки приводит к увеличению показателя преломления пленки. Также на дисперсию показателя преломления влияет состав газовой среды, в которой происходит распыление мишени (спектры 1–2). Увеличение процентного содержания аргона в газовой смеси приводит к уменьшению показателя преломления пленки. Поэтому можно предположить пористую структуру исследуемых пленок, что подтверждается результатами исследования поверхностей этих пленок сканирующим электронным микроскопом.

Достаточно большое значение невязки решения ОЗСЭ для однослойной модели (табл. 2) требует рассмотрения более сложной оптической модели исследуемых пленок для адекватного описания их структурных особенностей. Анализ данных из табл. 3 подтверждает выводы из работы [3], о том что между кремниевой подложкой и пленкой оксида титана в кислородной среде формируется слой оксида кремния. При этом

переходную область между слоями оксидов кремния и титана можно смоделировать системой бинарных слоев.

Заключение

В результате полученных решений ОЗСЭ для серии образцов неоднородных пленок оксида титана, осажденных методом ВЧ магнетронного распыления на кремниевые подложки восстановлен ход дисперсионных зависимостей показателя преломления $n(\lambda)$ этих пленок в видимой области спектра и взаимосвязь между спектрами $n(\lambda)$ и условиями формирования пленок; установлена структура исследуемых пленок, которую можно удовлетворительно описать пятислойной моделью бинарных слоев. Результаты исследования могут быть использованы для коррекции условий осаждения пленок оксида титана на кремниевые подложки методом ВЧ магнетронного распыления с требуемыми параметрами.

Литература

1. Miao L., Jin P., Kaneko K., Terai A., Nabatova-Gabain N., Tanemura S. Preparation and characterization of polycrystalline anatase and rutile TiO₂ thin films by RF magnetron sputtering. *Appl. Surf. Sci.* 2003. V. 12–213, P. 255–263.
2. Singh P., Kaur D. Room temperature growth of nanocrystalline anatase TiO₂ thin films by dc magnetron sputtering. *Physica B.* 2010. V. 405, P. 1258–1266.
3. Meng Li-J., Teixeira V., Cui H. ., Frank Placido, Xu Z., Santos M. P. A study of the optical properties of titanium oxide films prepared by dc reactive magnetron sputtering. *Appl. Surf. Sci.* 2006. V. 252, P. 7970–7974.
4. Ивашкевич И. В., Стаськов Н. И., Филиппов В. В., Чернов С. М. Исследование структуры пленок ZnO и TiO_x методами эллипсометрии. *Итоги научных исследований ученых МГУ имени А.А. Кулешова 2014 г.: сб. научн. ст. под ред. Е.К. Сычовой. Могилев: МГУ имени А.А. Кулешова, 2015. С. 43–47.*
5. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. Москва: Мир, 1981.
6. Ковалев В. И. Методы и приборы лазерной и спектральной эллипсометрии с бинарной модуляцией состояния поляризации: Приборы и методы экспериментальной физики: автореф. дис. соис. уч. ст. докт. тех. наук. Фрязино, 2011.
7. Siefke T., Kroker S., Pfeiffer K., Puffky O., Dietrich K., Franta D., Ohlídal I., Szeghalmi A., Kley E.-B., Tünnermann A. Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral range. *Adv. Opt. Mater.* 2016. № 4, P. 1780–1786.

Structural and optical properties of titanium oxide thin films on semiconductor substrates

I. V. Ivashkevich

*Mogilev State A. Kuleshov University, Mogilev, Belarus;
e-mail: iivashkevich@yandex.by*

The relationship between the optical properties of titanium oxide films and the conditions for the formation of these films by HF magnetron sputtering has been established. An increase in the substrate temperature leads to an increase in the refractive index of the film in the visible region of the spectrum. An increase in the percentage of argon in the gas mixture leads to a decrease in the refractive index of the film. The presence of an inhomogeneous transition layer between the silicon substrate and the titanium oxide film has been established.

Keywords: thin-film coatings, dispersion of optical characteristics, spectral ellipsometry.