

И. В. ИВАШКЕВИЧ, Н. И. СТАСЬКОВ, В. В. ФИЛИППОВ

Учреждение образования

«МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

им. А. А. Кулешова»

Могилев, Беларусь

В настоящее время перспективны для практического использования тонкопленочные прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов. Структуру таких плёнок можно оценивать из анализа их оптических характеристик – показателей преломления (n) и поглощения (k). В данной работе сделана попытка описать структуру плёнок TiO_x , пользуясь решениями обратных эллипсометрических задач.

Исследуемые пленки TiO_x были получены методом ВЧ-магнетронного распыления Ti на кремниевые подложки в газовой среде $Ar+O_2$. Условия формирования нескольких образцов указаны в табл. 1. На спектральном эллипсометре ES-2 были измерены спектры $tg\Psi(\lambda)$, $\cos\Delta(\lambda)$ пленок при углах падения света 60° , 65° и 70° в диапазоне $500-1000$ нм и на ЛЭФ-3М ($\lambda = 632,8$ нм) - поляризационные углы Ψ и Δ при углах падения от 60° до 76° с шагом 1° .

Табл. 1. Физические условия получения пленок

№ образца	Время распыления, мин	Мощность ВЧ магнетрона, Вт	Температура подложки, $^\circ C$	Процентное соотношение Ar/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			

Обратная задача спектральной эллипсометрии (ОЗСЭ) решалась в программном обеспечении (Spel) эллипсометра ES-2. Рассматривались 1-, 2-, и 5-слойная модели. Однослойная модель позволила определить толщину исследуемых пленок и эффективные показатели n и k . Значение показателя преломления пленок оказалось значительно ниже, чем значения показателей преломления диоксида титана как в фазе анатаза, так и рутила. Это может указывать на присутствие определенной доли титана. Расхождение измеренных и рассчитанных поляризационных углов, при решении ОЗСЭ ($\sigma = 0,0218$) для однослойной модели, значительно превышало погрешность измерений поляризационных углов. Это потребовало рассмотрения более сложных электродинамических моделей.

При использовании двухслойной модели учитывался переходный слой между кремниевой подложкой и пленкой TiO_x . Расхождение измеренных и рассчитанных поляризационных углов при решении ОЗСЭ изменилось

незначительно ($\sigma = 0,0212$), а значение толщины пленки уменьшилось на величину толщины переходного слоя (0,8 нм).

При использовании пятислойной модели ставили задачу обнаружить и учесть неоднородность пленки TiO_x по толщине. Каждый ее слой моделировался бинарным (модель Максвелла – Гарнетта) с различным процентным содержанием TiO_2 и TiO_x . Значения толщин этих слоев и процентное содержание компонент приведены в табл. 2. Нумерация слоев ведется от подложки. Расхождение измеренных и рассчитанных поляризационных углов в этом случае составила $\sigma = 0,0176$.

Табл. 2. Состав и толщины подслоев пленок

№	Процентное соотношение TiO_2/TiO_x в слое	Толщина слоя, нм	
		Образец № 1	Образец № 2
1	10/90	1,03	7,71
2	30/70	5,46	6,30
3	50/50	5,47	6,31
4	70/30	1,11	1,22
5	100/0	11,08	10,90

Обратная задача многоугловой эллипсометрии (ОЗМЭ) решалась методом наименьших квадратов для трехслойной модели, в которой переходный слой подложка - пленка и поверхностный слой на пленке учитывались поляризуемостями. Параметры трехслойных моделей обоих образцов представлены в табл. 3.

Табл. 3. Оптические характеристики пленок

Параметры модели	Образец № 1	Образец № 2
Показатель преломления слоя TiO_x	2,183	2,218
Показатель поглощения слоя TiO_x	0,146	0,324
Толщина слоя, нм	20,0	32,00
Поляризуемость поверхностного слоя, нм	-0,996	-0,362
Поляризуемость переходного слоя, нм	-2,717	-1,866
Расхождение (градусы)	0,244	0,623

Решения ОЗМЭ и ОЗСЭ дают практически одинаковую толщину слоев. Рассчитанные методом многоугловой эллипсометрии n , k слоя TiO_x близки к аналогичным эффективным параметрам однослойной модели в спектральной эллипсометрии на длине волны 632,8 нм (для образца № 1 $n = 2,215$, $k = 0,066$ (для образца № 2 $n = 2,328$, $k = 0,132$). Достаточно высокие значения поляризуемости переходных и поверхностных слоев указывают на неоднородность структуры пленок TiO_x . Толщины пленок, полученные при решении ОЗМЭ, близки к совокупной толщине в пятислойной модели ОЗСЭ.

Таким образом, установлено, что пленки TiO_x , сформированные методом ВЧ-магнетрона, при указанных выше условиях на кремниевых подложках, являются неоднородными по толщине. Их структуру с некоторым приближением можно описывать пятислойной моделью из бинарных слоев TiO_2/TiO_x .