

УДК 535.32: 535.51: 538.975

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК ОКСИДА НИКЕЛЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЧ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

И. В. Ивашкевич

кандидат физико-математических наук, доцент

Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова

Определена дисперсия оптических характеристик пленок оксида никеля в видимой области спектра и установлена их зависимость от условий формирования пленок методом ВЧ магнетронного напыления. Сравнительный анализ рассчитанных спектров показателей преломления и поглощения показал, что в значительной мере на ход дисперсионных кривых оказывает тип подложки и ее температура. Пленки, осажденные на кремниевые подложки, обладают наиболее оптимальными свойствами для применения в фотоэлектрических элементах.

Ключевые слова: спектральная эллипсометрия, оптические характеристики, тонкие пленки.

Введение

Благодаря своим уникальным оптическим и электрическим свойствам, а также хорошей химической стабильности оксид никеля (NiO) в последнее время стал наиболее перспективным материалом для фотоэлектрических солнечных элементов, в первую очередь в качестве прозрачных проводящих электродов [1–2]. Поэтому необходимо разработать технологические режимы получения тонких пленок NiO с оптимальными характеристиками для их применения в фотовольтаике. Наиболее подходящим методом исследования оптических и электрических свойств таких пленок является метод спектральной эллипсометрии в силу своей информативности и как неразрушающий метод [3].

В данной работе для установления влияния условий формирования тонких пленок оксида никеля методом высокочастотного магнетронного распыления на их оптические свойства исследуются оптические характеристики (показатели преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$) данных пленок, определенные методом спектральной эллипсометрии.

Эксперимент

Для исследования была предоставлена серия образцов пленок оксида никеля, осажденных на кремниевые и стеклянные подложки методом высокочастотного магнетронного распыления при различных режимах получения (БГУИР, Минск). Информация об условиях формирования исследуемых пленок представлена в таблице 1. Для образцов 1, 3 – 5 в качестве мишени использовалась фольга никеля, предварительно отожженная в среде кислорода при температуре 950°C в течение 10 минут. Для образца 2 добавлялась еще одна мишень из фольги чистого никеля. Угол наклона между подложкой и мишенью в ВЧ магнетроне 45°. Нанесение пленки оксида никеля на образцы осуществлялось распылением мишени в газовой

среде аргона с кислородом.

Таблица 1 – Условия формирования пленок NiO

Номер образца	Тип подложки	Температура подложки, °C	Время напыления, min.
1	c-Si	25	10
2	c-Si (2 мишени)	25	10
3	SiO ₂	25	10
4	SiO ₂	25	5
5	SiO ₂	400	5

Проводились измерения спектров $\text{tg}\Psi(\lambda)$ и $\text{cos}\Delta(\lambda)$ на спектральном эллипсометре ES-2 [4] исследуемых пленок оксида никеля на кремниевых и стеклянных подложках при углах падения излучения 75°, 70°, 65° и 60° в спектральном диапазоне 400–1000 нм (рисунок 1).

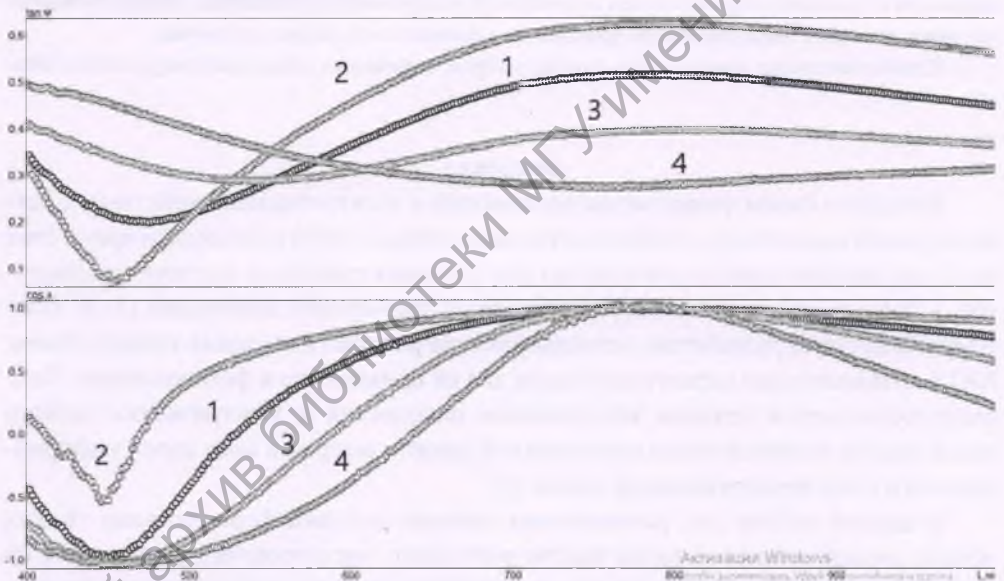


Рисунок 1 – Экспериментальные спектры $\text{tg}\Psi(\lambda)$ и $\text{cos}\Delta(\lambda)$ пленки NiO (образец 1) (спектры 1, 2, 3, 4 – при углах падения 70°, 75°, 65°, 60° соответственно)

С целью определения дисперсии показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$ исследуемых пленок был разработан алгоритм решения обратной задачи спектральной эллипсометрии (ОЗСЭ) для модели двухслойного клина на полубесконечной подложке (рисунок 2). Выбор этой модели обусловлен, во-первых, наклонным расположением подложки к оси магнетрона, что может вызвать неоднородность по толщине у сформированных пленок [5]. Во-вторых, в процессе осаждения пленок на подложки возможно формирование переходного слоя между пленкой и подложкой, оптические характеристики которого отличны от обеих сред [6].

Решение ОЗСЭ было получено для экспериментальных спектров поляризационных углов при 4-х углах падения излучения (рисунок 1), при этом дисперсия оптических характеристик подложек задавалась известной [7], переходный слой

описывался как бинарный моделью Максвелла – Гарнетта [8], а дисперсию оптических характеристик слоя задавали упрощенной моделью Зельмейера [4]

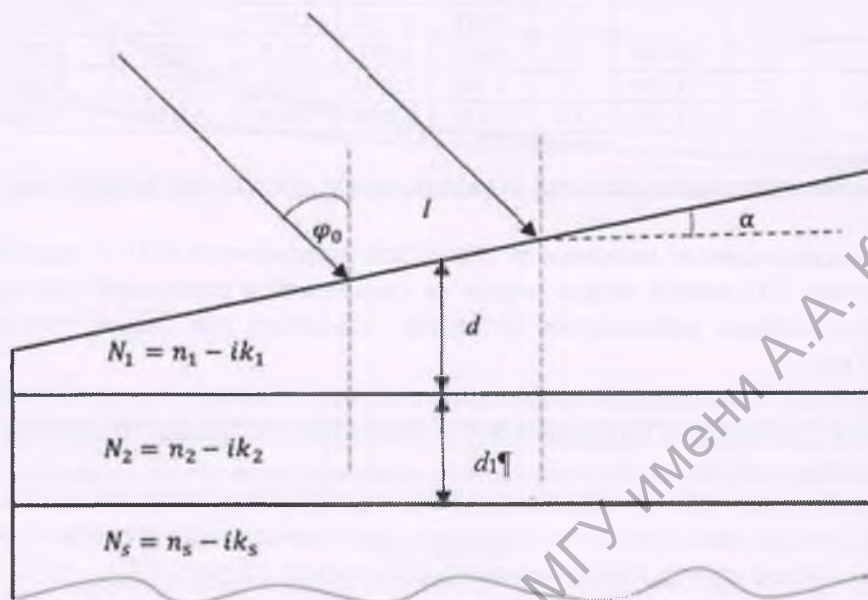


Рисунок 2 – Двухслойная модель клиновидной пленки на полубесконечной подложке: α – угловая толщина клина, N_1 , N_2 и N_3 – комплексный показатель преломления пленки, переходного слоя и полубесконечной подложки соответственно; φ_0 – угол падения излучения

$$n(\lambda)^2 = n_0^2 + \frac{1}{\left(1 - \frac{\lambda_m^2}{\lambda^2}\right)}, \quad k(\lambda) = k_m e^{\frac{\lambda_m - \lambda}{\lambda_1}},$$

где n_0 – значение показателя преломления на бесконечной длине волны; λ_0 – длина волны, на которой $n \rightarrow \infty$, $\lambda_m = 550$ нм; n_m – значение показателя преломления на длине волны λ_m , k_m – значение показателя поглощения k на длине волны λ_m , λ_1 – интервал длины волны, на котором k меняется в e раз.

Результаты и их обсуждение

Результаты решения обратной задачи спектральной эллипсометрии для исследуемых образцов представлены в таблице 2. Как видно из данных таблицы 2, пленки, осажденные на кремниевые подложки, оказались однородными по толщине и их структура удовлетворительно описывается однослойной моделью ($\alpha = 0$, $d_1 = 0$). Пленки, сформированные на стеклянных подложках, имеют худшую адгезию с подложкой. На это указывает наличие переходного слоя, толщина которого соизмерима с толщиной самой пленки (образцы 4, 5). При этом наблюдается неоднородность толщины пленок вдоль поверхности ($\alpha \neq 0$).

Таблица 2 – Рассчитанные параметры пленок

№ образца	d , нм	α , рад.	d_1 , нм	n_0	k_0	l	l	Deviation
1	102	-	-	2.263	0.074	316.6	391150	0.0224
2	113	-	-	2.061	0.104	114.5	132.4	0.0356
3	103	$8,9 \cdot 10^{-6}$	8	2.015	0.081	278.3	40121	0.0271
4	26	$3,5 \cdot 10^{-6}$	11	1.956	0.0536	163.4	70522	0.0304
5	23	$4,1 \cdot 10^{-6}$	14	1.976	0.0084	254.4	33182	0.0206

Анализ полученных решений обратной задачи спектральной эллипсометрии показал:

– дисперсионные зависимости показателя преломления $n(\lambda)$ и показателя поглощения $k(\lambda)$ пленок оксида никеля на кремниевой и стеклянной подложках удовлетворительно описываются формулой Зельмейера для пленок толщиной $d > 100$ нм;

– пленки, осажденные на кремниевые подложки, обладают более высоким показателем преломления по сравнению с пленками на стеклянных подложках (рисунок 3, 4);

– добавление чистой никелевой мишени при формировании пленок оксида никеля методом высокочастотного магнетронного распыления приводит к образованию пленок оксида никеля нестехиометрического состава (NiO_x , $x < 1$); рассчитанный спектр показателя преломления таких пленок (рисунок 3, спектр 2) значительно ниже аналогичного спектра $n(\lambda)$ (рисунок 3, спектр 1) стехиометрической пленки NiO , а прозрачность пленки NiO_x значительно выше в области $\lambda > 500$ нм;

– повышение температуры подложки приводит к значительному снижению показателя поглощения пленок оксида никеля, осажденных на стеклянные подложки (рисунок 4).

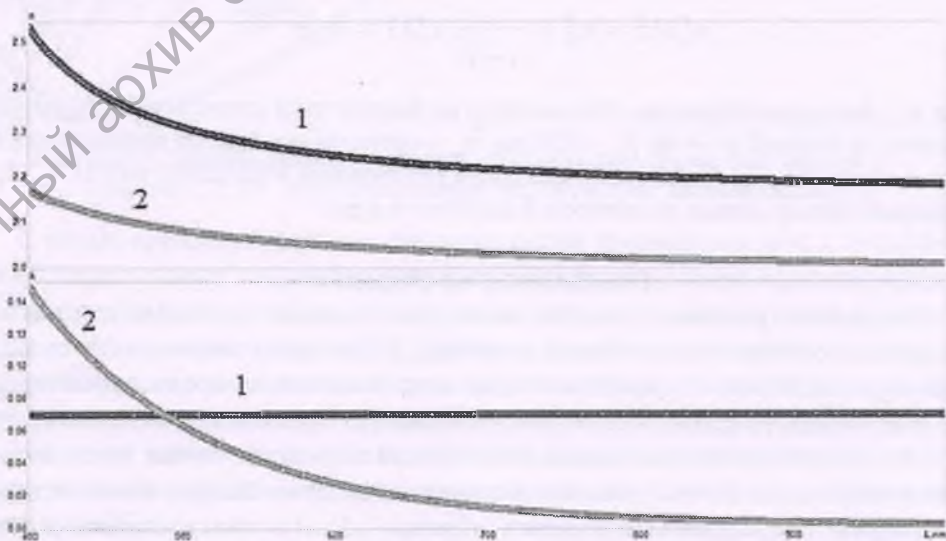


Рисунок 3 – Рассчитанные дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения образцов 1 и 2

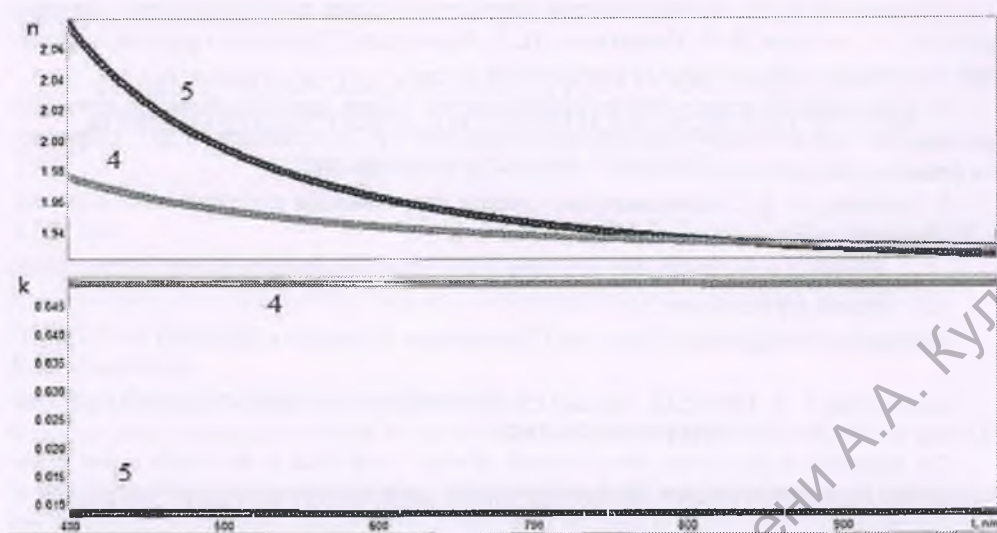


Рисунок 4 – Рассчитанные дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения образцов 4 и 5

Заключение

Для отработки оптимальных режимов ВЧ магнетронного распыления тонких пленок оксида никеля, используемых в фотовольтаике, были проанализированы оптические характеристики серии пленок оксида никеля, осажденных на кремниевую и стеклянную подложки. Обнаружено, что основными факторами, влияющими на ход дисперсии показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$ пленок NiO, являются тип подложки, а также ее температура. Пленки, осажденные на кремниевые подложки, обладают наиболее оптимальными свойствами для применения в фотоэлектрических элементах.

Результаты исследования могут быть использованы для корректировки условий осаждения пленок оксида никеля на кремниевые и стеклянные подложки методом ВЧ магнетронного распыления с оптимальными условиями для использования в фотовольтаике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Jamala, M. S.* Effects of growth temperature on the photovoltaic properties of RF sputtered undoped NiO thin films / M. S. Jamala, b, S. A. Shahahmadie, P. Chelvanathana – Results in Physics Volume 14, September 2019, 102360.
2. Особенности магнетронного напыления тонких пленок оксида никеля для применения в составе перовскитных солнечных элементов / А. С. Агликов [и др.] // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, вып. 3. – С. 460–464.
3. *Аззам, Р.* Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара. – М.: Мир, 1981. – 583 с.
4. Спектральная эллипсометрия многослойных гетероструктур ZnS/ZnSe / В. И. Ковалев [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2002. – Т. 69, № 2. – С. 258–263.
5. *Ивашкевич, И. В.* Спектральная эллипсометрия неоднородных полупроводниковых пленок / И. В. Ивашкевич, Е. В. Третьяк // Веснік МДУ імя А. А. Куляшова. Серія В. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 54–60.

6. Стаськов, Н. И. Эллипсометрия переходных слоев полупроводник – диэлектрик / Н. И. Стаськов, И. В. Ивашкевич, Н. А. Крехотень // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 2(15). – С. 18–24.

7. Учет влияния естественного поверхностного слоя при исследовании кремниевых пластин методом спектральной эллипсометрии / Н. И. Стаськов [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 1 – С. 26–30.

8. **Ржанов, А. В.** Эллипсометрия – метод исследования поверхности / под ред. А. В. Ржанова. – Новосибирск : Наука, 1983. – 180 с.

Поступила в редакцию 18.11.2021 г.

Контакты: ivashkevich@msu.by (Ивашкевич Инна Викторовна)

Ivashkevich I. V. OPTICAL CHARACTERISTICS OF NICKEL OXIDE FILMS OBTAINED BY HF MAGNETRON SPUTTERING.

The dispersion of the optical characteristics of nickel oxide films in the visible region of the spectrum has been determined, and the dependence of the optical characteristics on the conditions of the film formation by HF magnetron sputtering has been established. The comparative analysis of the calculated spectra of refractive indices and absorption has shown that the dispersion curves are significantly influenced by the type of substrate and its temperature. The films deposited on silicon substrates have the most optimal properties for photovoltaic cells use.

Keywords: spectral ellipsometry, optical constants, thin films.