

06;07

Частотная дисперсия пленок оксида тантала

© А.А. Барыбин, Ю.А. Быстров, А.Е. Комлев,
А.В. Мезенов, В.И. Шаповалов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет

Поступило в Редакцию 22 сентября 2005 г.

Исследованы тонкие пленки оксида тантала, осажденные на подложке из оптического кварцевого стекла методом реактивного магнетронного распыления. Установлено влияние нанонеоднородностей в пленках на результаты определения дисперсии оптических постоянных пленок по экспериментальным спектрам пропускания.

PACS: 68.55.a, 68.60.-p

Тонкие пленки оксида тантала обладают высоким показателем преломления и слабым поглощением в видимом диапазоне, поэтому используются в многослойных интерференционных фильтрах как антиотражающие покрытия для солнечных батарей и в оптических волноводах [1,2]. Кроме того, оксид тантала является материалом с высокой диэлектрической проницаемостью и хорошими изоляционными свойствами. Поэтому тонкие слои оксида тантала перспективны для использования в качестве диэлектрика МДМ (металл-диэлектрик-металл) и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структур в устройствах современной микроэлектроники [3].

В данной работе исследованы пленки оксида тантала, выращенные методом реактивного магнетронного распыления. Обычно пленки оксида тантала, полученные этим методом при температуре подложки ниже 300°C , аморфны, однородны [4,5] и обладают нормальной частотной дисперсией показателей преломления n и поглощения k [6]. Пленки получены нами в типовой высоковакуумной системе с остаточным давлением $5 \cdot 10^{-4}$ Па в газовой среде $\text{Ar} + \text{O}_2$ на подложках из листового оптического кварцевого стекла марки КУ-1 при температуре 300°C . Аксиальный магнетрон с мишенью из химически чистого тантала работал на постоянном токе. На держателе подложек устанавливали потенциал смещения двух типов: плавающий и -100 В. Установка

снабжена ионной очисткой. Длительность процесса осаждения пленок во всех экспериментах была одинакова.

Цель исследования состояла в изучении влияния потенциала смещения на процесс осаждения пленок. Для характеристики пленок были сняты зависимости показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $k(\lambda)$ от длины волны излучения λ . Зависимости $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ и толщину d каждой пленки определяли по экспериментальному спектру пропускания $T(\lambda)$, который измеряли с помощью спектрометра СФ-26. Расчеты были проведены по методике, изложенной в работе [7]. Эта методика широко используется для исследования оптических свойств оксидных пленок. За последние пять лет упоминание о ней встречается во многих публикациях. Авторы данной работы провели детальный анализ математических моделей, применяемых в этой методике. Здесь обратим внимание лишь на то, что уравнения, которые используются в расчетной методике, получены из граничных условий задачи распространения электромагнитной волны в многослойной среде с однородными слоями [8]. Эта задача соответствует измерению спектра пропускания однородной тонкой пленки, осажденной на однородную прозрачную подложку.

На рис. 1 приведены экспериментальные спектры пропускания $T(\lambda)$ для двух образцов. По частоте осциллирующий спектр виден, что толщина пленки в образце 1 больше, чем в образце 2. Вычисление скорости роста пленок по нескольким экспериментам (толщина каждой пленки определена по спектру пропускания в области высокой прозрачности ($\lambda > 600$ nm) [8]) привело к следующим результатам:

при плавающем потенциале скорость роста (78 ± 5) nm/min,

при потенциале -100 V скорость роста (52 ± 5) nm/min.

По спектрам $T(\lambda)$ вычислены зависимости $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ для обеих пленок. На рис. 2 показаны типичные результаты для показателя преломления обеих пленок, где точками обозначены значения, вычисленные по соответствующим спектрам пропускания, а сплошные кривые построены по этим точкам методом наименьших квадратов.

Из рис. 2 следует, что пленки, осажденные при плавающем потенциале на держателе, обладают нормальной частотной дисперсией, характерной для диэлектриков в видимой области спектра. Результаты для этих пленок соответствуют данным работы [6]. Отрицательный потенциал смещения существенным образом изменяет зависимость $n(\lambda)$, а именно, ход дисперсии показателя преломления становится аномальным

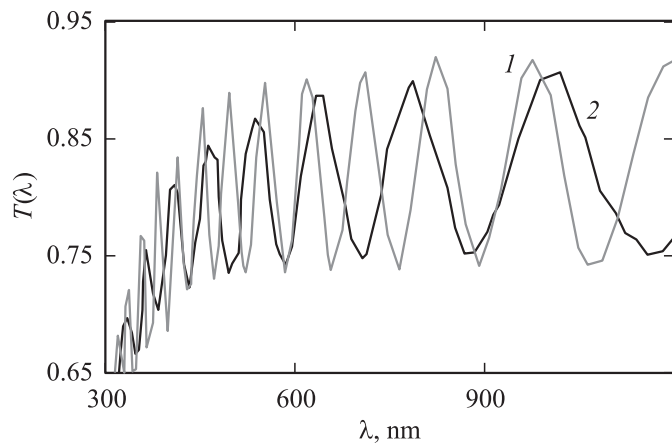


Рис. 1. Спектры пропускания пленок оксида тантала, осажденных на оптическое кварцевое стекло при потенциале на держателе подложки: 1 — плавающем, 2 — -100 V.

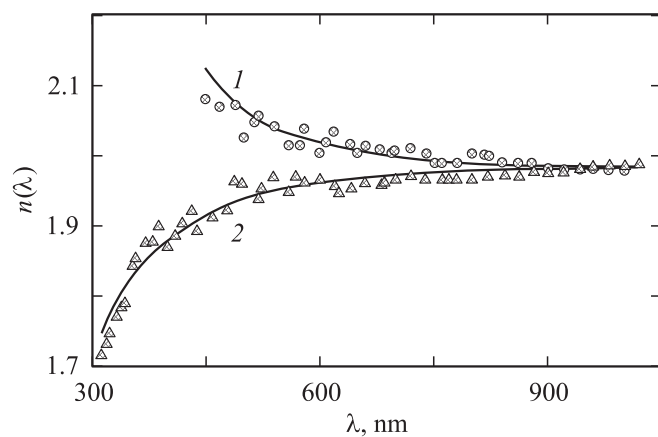


Рис. 2. Показатели преломления пленок оксида тантала, осажденных при потенциале на держателе подложки: 1 — плавающем, 2 — -100 V. Точками показаны значения, вычисленные по соответствующим спектрам пропускания, сплошные кривые — модели, построенные по точкам методом наименьших квадратов.

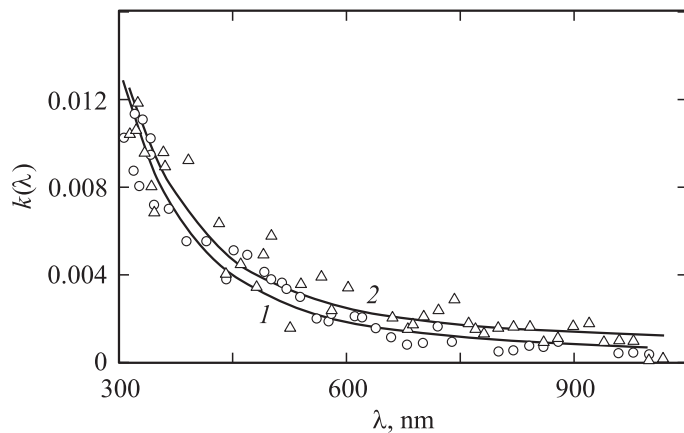


Рис. 3. Показатели поглощения пленок оксида тантала, осажденных при потенциале на держателе подложки: 1 — плавающим, 2 — -100 V. Точками показаны значения, вычисленные по соответствующим спектрам пропускания, сплошные кривые — модели, построенные по точкам методом наименьших квадратов.

(кривая 2). В то же время электронная структура пленки, осажденной в этом режиме, не изменилась: полоса фундаментального поглощения (не показанная на рис. 1) для обеих пленок начинается около 275 nm, что соответствует ширине оптической щели 4.52 eV, характерной для стехиометрической пленки оксида тантала. Типичные зависимости $k(\lambda)$ для пленок обоих типов представлены на рис. 3. Дисперсия показателя поглощения этих пленок соответствует классической теории дисперсии в диэлектриках для видимого диапазона [9]. Однако пленки, осажденные при отрицательном потенциале на держателе, имеют большее поглощение.

Можно предположить, что результат, полученный для образца 2, обусловлен структурными неоднородностями пленки. В этом случае применение расчетной методики, основанной на модели однородной пленки, некорректно. Для проверки этого предположения был проведен эксперимент по рассеянию света, в котором пленки Ta_2O_5 на оптическом кварцевом стекле облучали светом гелий-неонового лазера ЛГ-75. Типичные результаты показаны на рис. 4, откуда видно,

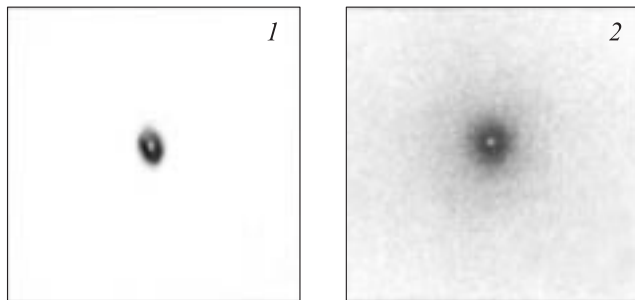


Рис. 4. Инверсное изображение экрана, расположенного позади структуры Ta_2O_5/SiO_2 , засвеченной пучком лазера ($\lambda = 630 \text{ nm}$), для пленок с дисперсией показателя преломления: 1 — нормальной, 2 — аномальной.

что в пленке 2 (рис. 4, *b*), в отличие от пленок с нормальной дисперсией (рис. 4, *a*), наблюдается слабое диффузное рассеяние света. Диффузное рассеяние возникает на неоднородностях структуры пленки, которые имеют размер примерно на порядок меньше длины волны. В данном случае эти размеры можно оценить величиной порядка десятков нанометров. Даже слабое диффузное рассеяние в наших пленках привело к уменьшению на несколько процентов их коэффициента пропускания во всем диапазоне длин волн (рис. 1). В свою очередь, математическая модель спектра пропускания однородной пленки, положенная в основу методики расчета, дала результат в виде аномальной дисперсии показателя преломления и повышенных значений показателя поглощения. Такой результат следует признать артефактом.

Выводы. 1. Установлено, что при осаждении тонких пленок оксида тантала методом реактивного магнетронного распыления потенциал смещения на держателе подложек оказывает существенное влияние на их свойства. При плавающем потенциале формируются однородные пленки, обладающие нормальной частотной дисперсией оптических постоянных.

2. Пленки, осажденные при отрицательном смещении (-100 V), имеют наноразмерные неоднородности, которые искажают спектр пропускания за счет диффузного рассеяния света.

3. Широко используемая методика определения оптических постоянных для пленок по экспериментальным спектрам пропускания непригодна, если пленки имеют наноразмерные структурные неоднородности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 04–03–32253–а).

Список литературы

- [1] Rao N.R., Chandramani R., Rao G.M. // J. Mater. Sci. Lett. 1999. V. 18. N 23. P. 1949.
- [2] Chang P.-H., Liu H.-Y. // Thin Solid Films. 1995. V. 258. P. 56.
- [3] Franke E., Schubert M., Trimble C.L. et al. // Thin Solid Films. 2001. V. 388. N 1–2. P. 283.
- [4] Ono H., Hosokawa Y., Shinoda K. et al. // Thin Solid Films. 2001. V. 381. N 1. P. 57.
- [5] Zhang J.-Y., Boyd I.W. // Appl. Sur. Sci. 2002. V. 86. N 1–4. P. 40.
- [6] Kukli K., Aarik J., Aidla A. et al. // Thin Solid Films. 1995. V. 260. P. 135.
- [7] Ayadi K., Haddaoui N.J. // Mater. Sci. Mater. Electron. 2000. V. 11. N 2. P. 163.
- [8] Барыбин А.А., Мезенов А.В., Шаповалов В.И. // Перспективные материалы. 2005. № 2. С. 83–88.
- [9] Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника / Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 430 с. (Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. Semiconductor Opto-Electronics. Butterworth and Co. Ltd, 1973).