

УДК 535-92

Способ повышения контраста изображений структурированных плёночных покрытий

***Стасенко К.В.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

***Цепулин В.Г.**, студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научные руководители: Животовский И.В., кандидат технических наук,
доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы»,
Толстогузов В.Л., научный сотрудник лаборатории
микро-опто-электро-механических систем НОЦ «Фотоника и ИК-техника»*

МГТУ им. Н. Э. Баумана

baryshnikov@bmstu.ru

Оценка качества формирования прозрачных в видимой области и одновременно проводящих плёночных покрытий является важной задачей в производстве современных матричных индикаторов и сенсорных экранов. Одним из наиболее часто используемых для этих целей материалов является оксид индия, легированный оловом, (ITO).

ITO является полупроводником n-типа с широкой запрещенной зоной (3.3 – 4.3 эВ), который обладает высокой прозрачностью в видимом и ближнем ИК диапазоне. Покрытия на основе ITO широко используются в качестве прозрачных электродов в различных оптико-электронных устройствах: солнечных элементах, жидкокристаллических экранах, органических светоизлучающих диодах (OLEDs) и других индикаторных панелях [1,5].

Хорошо известно, что качество поверхности ИТО пленок (царапины, сколы, неравномерность нанесения и т.д.) является важным параметром во многих применениях и оказывает существенное влияние на характеристики индикаторов [1,5]. Однако поиск этих дефектов методами классической микроскопии затруднителен, поскольку ИТО-покрытия прозрачны в видимой области и их изображения обладают низким контрастом. Пример изображения ИТО дорожек, полученных с помощью классических микроскопов, показан на рисунке 1.



Рис. 1. Изображение образца с ИТО покрытием, полученное при помощи:
а - биологического микроскопа фирмы «Nikon» в проходящем свете; б - биологического микроскопа фирмы «ZEISS», в отраженном свете

Повысить контраст изображения ИТО-дорожек на прозрачной подложке можно при наблюдении их под углом Брюстера. Угол Брюстера – такой угол падения, при котором параллельная составляющая поляризации света (электрическая составляющая излучения поляризована в той же плоскости, что и падающий луч и нормаль к поверхности) полностью проходит через прозрачную диэлектрическую поверхность, без отражения. При падении неполяризованного света на какую-либо поверхность под углом Брюстера, свет, отраженный от этой поверхности, будет полностью поляризован [3]. Угол Брюстера определяется согласно формуле [2]:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (1)$$

где n_1 показатель преломления первой среды, через которую распространяется свет, и n_2 показатель преломления второй среды.

Однако из-за эффекта интерференции в тонких плёнках контраст может существенно меняться в зависимости от λ . Найдем зависимость контраста изображений

ITO плёнок от длины волны падающего излучения, определив зависимость отражательной способности поверхности ITO плёнки от λ .

Интерференция в тонких пленках в зависимости от длины волны, показателя преломления, толщины пленки и угла падения может носить деструктивный (минимальное отражение) или конструктивный (максимальное отражение) характер. Принимая показатель преломления в видимой области и толщину ITO пленки постоянными, а также используя рассчитанный угол падения, можно определить диапазон длин волн, в котором будет наблюдаться максимальный коэффициент отражения (максимальная отражательная способность). Согласно [3] отражательная способность определяется по формуле:

$$R(\lambda) = \frac{\rho_{12}^2 \exp\left(2v_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right) + \rho_{23}^2 \exp\left(-2v_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right) + 2\rho_{12}\rho_{23} \cos\left(\varphi_{23} - \varphi_{12} + 2u_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right)}{\exp\left(2v_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right) + \rho_{12}^2 \rho_{23}^2 \exp\left(-2v_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right) + 2\rho_{12}\rho_{23} \cos\left(\varphi_{23} + \varphi_{12} + 2u_2 \frac{2\pi}{\lambda}\right)},$$

(2)

где ρ_{ij} - абсолютное значение коэффициента отражения от ij границы раздела; v_2 , u_2 - коэффициенты, зависящие от показателя преломления (n_2), коэффициента экстинкции (κ_2) ITO пленки и угла падения на пленку (θ_1); φ_{ij} - набег фазы при отражении от ij границы раздела; λ - длина волны в вакууме.

Итак, при угле падения $\theta_1 = 56^\circ$, толщине ITO пленки $d = 300$ нм, подложки $d_1 = 1$ мм, показателе преломления ITO пленки в видимом диапазоне $n_2 = 2.05$, показателе преломления подложки $n_3 = 1.5$ был построен график отражательной способности ITO покрытия в зависимости от длины волны: $R_1(\lambda)$ (см. рис. 2).

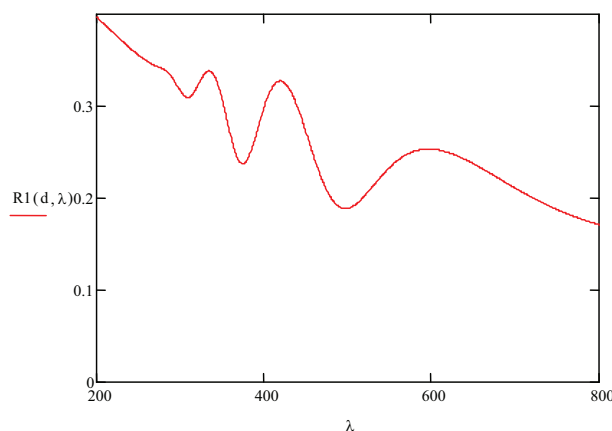


Рис. 2. Зависимость отражательной способности ITO покрытия ($R_1(\lambda)$) от длины волны

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод о том, что отражательная способность ИТО покрытия $R_1(\lambda)$ имеет три максимума в диапазоне длин волн $\Delta\lambda=200\ldots800$ нм. Максимальное значение $R_1(\lambda)=0.338$ наблюдается в УФ области при $\Delta\lambda=330\ldots335$ нм, следующее по величине значение $R_1(\lambda)=0.328$ находится в видимой области при $\Delta\lambda=415\ldots420$ нм. Следовательно, с практической точки зрения целесообразно использовать диапазон $\Delta\lambda=415\ldots420$ нм, так как в этой области существуют доступные и недорогие источники излучения.

Основываясь на вышеприведенных расчетах, был проведен эксперимент с целью подтверждения найденного диапазона длин волн. Эксперимент проводился на специально собранной установке, функциональная схема оптической системы которой приведена на рисунке 3

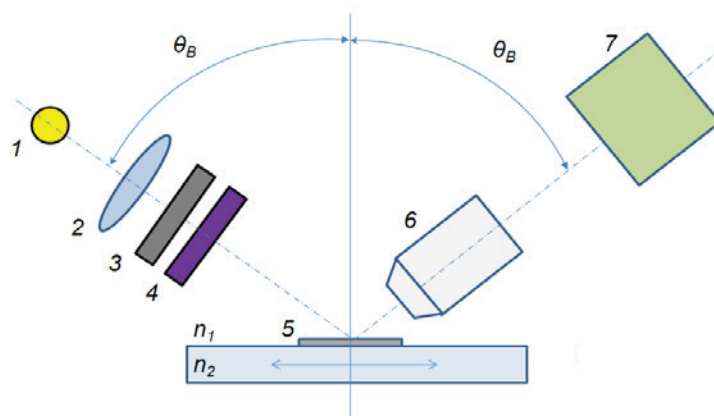


Рис. 3. Функциональная схема оптической системы прибора для наблюдения на стеклянной подложке с наилучшим контрастом ИТО структур: 1 – источник излучения; 2 – линза; 3 – дихроичный поляризатор; 4 – цветной светофильтр; 5 – образец с ИТО пленкой; 6 – микрообъектив; 7 – камера с линейкой приемников излучения

Стоит отметить, что некоторые компоненты данной установки, могут быть извлечены из схемы, т. е. схема позволяет проводить измерения без поляризатора или же менять фильтр. В качестве источника излучения на всех этапах эксперимента в установке использовался «белый» лазерный диод.

Образец, представляющий собой стеклянную подложку с нанесенной на одну из ее поверхностей ИТО пленкой, на первом этапе эксперимента помещался в прибор без поляризатора 3 и цветного фильтра 4 с фиксированным углом падения. Угол падения

равнялся углу Брюстера, рассчитанного по формуле (1) для воздуха $n_1=1.0003$ и подложки $n_2=1.5$: $\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arctan\left(\frac{1.5}{1}\right) \approx 56^\circ$.

Для пояснения энергетических соотношений рассмотрим рисунок 4, который иллюстрирует ход лучей в исследуемом образце. Из рисунка 4 видно, что в случае падения излучения на контролируемую поверхность под углом θ_B в плоскость анализа попадет как излучение, отраженное ИТО, так и излучение, отраженное от верхней поверхности подложки.

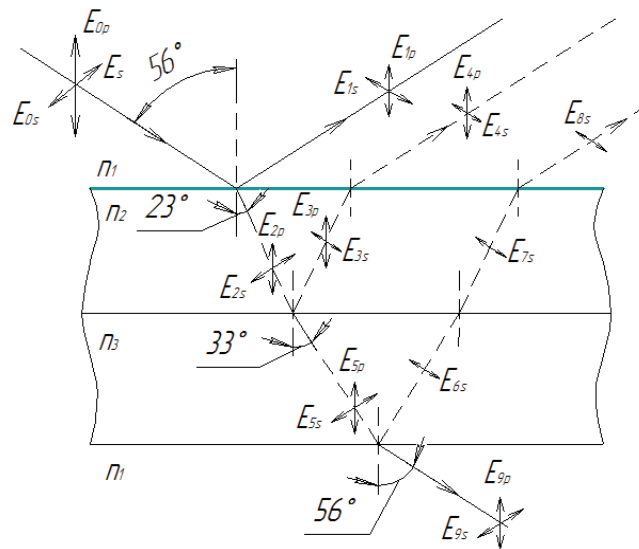


Рис. 4. Ход лучей в образце в случае отсутствия в установке поляризатора: n_1 – показатель преломления воздуха; n_2 – ИТО пленки; n_3 – подложки; E_{ip} и E_{is} – соответственно амплитуды параллельной и перпендикулярной электрической составляющей падающей электромагнитной волны в i -й среде; толстой линией выделена контролируемая поверхность

Таким образом, отражение от подложки будет меньше, а отношение интенсивностей от ИТО дорожки и подложки больше, чем при угле падения не равном углу Брюстера. Изображение исследуемого образца, полученное при помощи собранной установки с «белым» лазерным диодом, представлено на рисунке 5.

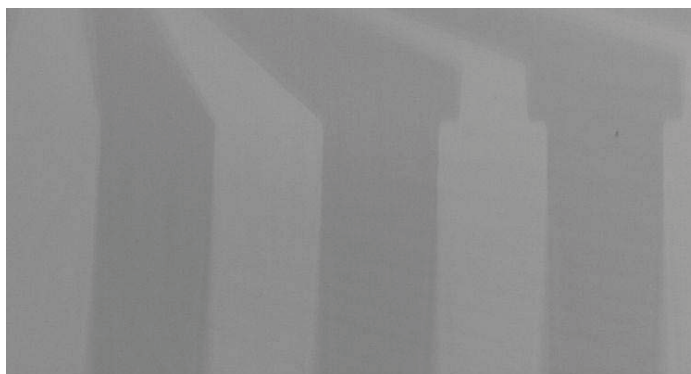


Рис. 5. Изображение образца с ИТО дорожками: получено на собранной установке с «белым» лазерным диодом, установленным под углом Брюстера к образцу, без поляризатора

С целью минимизации интенсивности излучения, отраженного от подложки, в эксперименте использовался дихроичный поляризатор, поглощающий параллельную составляющую падающей электромагнитной волны. В этом случае контраст между ИТО дорожками и подложкой будет больше, чем в предыдущем случае, что подтверждает рисунок 6.



Рис. 6. Изображение исследуемого образца, полученное при помощи собранной установки с «белым» лазерным диодом, установленным под углом Брюстера к образцу, и дополненной дихроичным поляризатором

На следующем этапе в установку поочередно устанавливался красный и фиолетовый светофильтр. Угол падения излучения на образец - угол Брюстера. Изображения ИТО-дорожек, полученные при использовании красного и фиолетового светофильтров, представлены на рисунке 7. Из сравнения этих изображений делаем вывод о том, что наилучший контраст наблюдается при установке источника излучения

под углом Брюстера и одновременном использовании в функциональной схеме прибора компонентов: фиолетового светофильтра и дихроичного поляризатора.

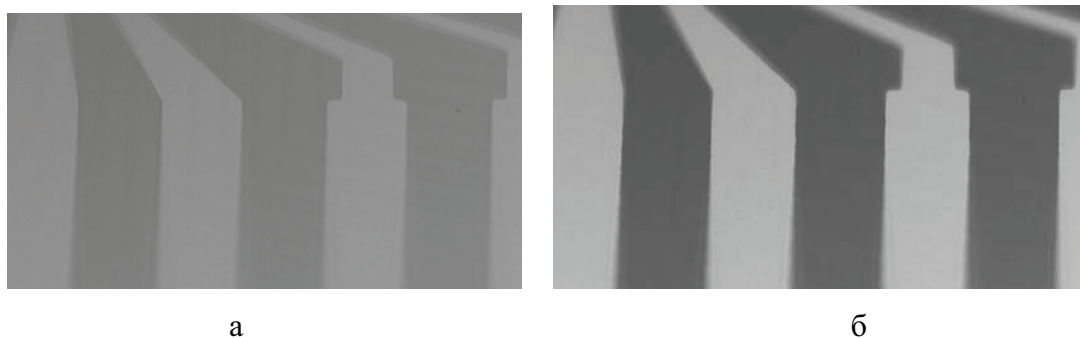


Рис. 7. Изображения исследуемого образца, полученные при помощи собранной установки, включающей в себя: «белый» лазерный диод, дихроичный поляризатор и поочередно устанавливаемым светофильтром: а – с красным; б – с фиолетовым

Таким образом, в процессе выполнения данной работы удалось усовершенствовать метод наблюдения плёночных структур при наблюдении образца под углом Брюстера за счет правильного выбора диапазона длин волн падающего излучения. Тем самым удалось повысить коэффициент отражения от плёнки в 1.2-2 раза, что обеспечивает высокий контраст изображений ИТО дорожек. Рекомендуемый диапазон длин волн для наблюдения плёночных структур был теоретически рассчитан в общем виде и экспериментально подтвержден.

Список литературы

1. Н. Kim, C.M. Gilmore, A. Pique, J.S. Horwitz, H. Mattoussi, H. Murata, Z.H. Kafafi, and D.B. Chrisey “Electrical, optical, and structural properties of indium–tin–oxide thin films for organic light-emitting devices”, Journal Of Applied Physics, volume 86, number 11, 6451-6461.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М., 1973г., 720 стр. с илл.
3. D. Raoufi et al., “Surface characterization and microstructure of ITO thin films at different annealing temperatures”, Applied Surface Science 253 (2007) 9085–9090.