

# Формирование рассеивающего свет микрорельефа при атомно-слоевом осаждении диэлектрика на наноструктурированные пленки оксида индия-олова

© В.В. Аксенова<sup>1</sup>, И.П. Смирнова<sup>1</sup>, Л.К. Марков<sup>1</sup>, А.С. Павлюченко<sup>1</sup>, Д.С. Колоколов<sup>2</sup>, М.В. Меш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО „СКТБ Кольцова“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: valeriyaakse@gmail.com

Поступила в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 7 сентября 2023 г.

Принята к публикации 30 октября 2023 г.

Представлен метод создания рассеивающего свет рельефа на стадии формирования нижнего слоя диэлектрика при изготовлении электролюминесцентных дисплеев. Для исследования процесса формирования рассеивающего свет рельефа были изготовлены пленки с различными толщинами слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , получены РЭМ-изображения сколов сформированных пленок, а также измерены диаграммы направленности рассеяния света на них. Показано, что получаемый на границе диэлектрика рельеф создает рассеивающую свет структуру, способствующую повышению эффективности вывода света из активного слоя электролюминесцентного дисплея.

**Ключевые слова:** наноструктурированный ИТО, рассеивающий свет микрорельеф, эффективность вывода света.

DOI: 10.61011/FTT.2023.12.56745.5093k

## 1. Введение

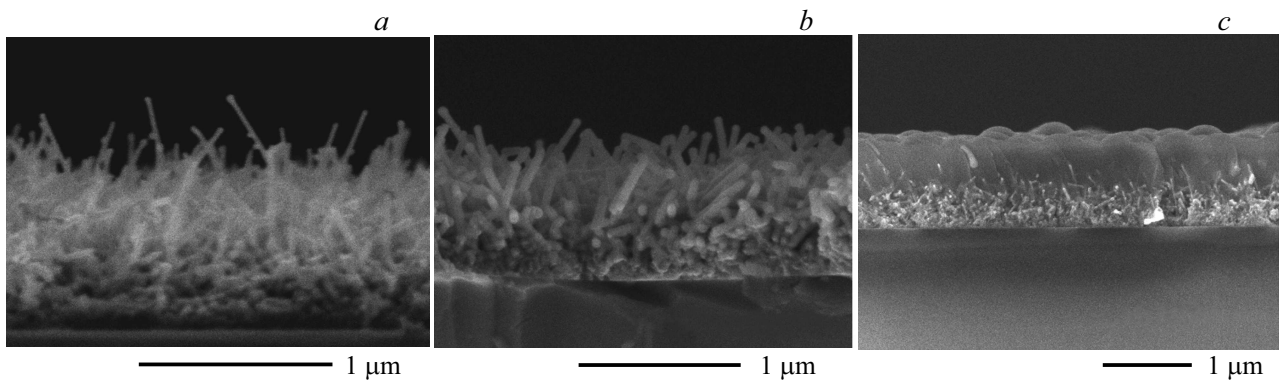
При изготовлении пленочных источников света (светодиодных, дисплейных структур) одной из часто возникающих проблем является низкая эффективность вывода света за счет эффекта полного внутреннего отражения на границе раздела светоизлучающих слоев и прилегающих прозрачных материалов. Свет, излучаемый под углами больше угла полного внутреннего отражения, поглощается в активном слое, снижая эффективность прибора. Для увеличения доли выводимого света на границах активного слоя создается рассеивающий свет рельеф, увеличивающий долю света, выводимого наружу. Такой рельеф может быть заранее сформирован на подложке [1–3], создан в процессе выращивания активных слоев или получен на постростовой стадии травлением или нанесением структурированных слоев [4]. В данной работе решается проблема вывода света из слоя люминофора электролюминесцентных дисплеев, заключенного между двумя слоями диэлектрика. У большинства применяемых материалов слоя люминофора показатель преломления относительно высок ( $n(\text{ZnS}) = 2.3–2.4$ ,  $n(\text{CdS}) = 2.5$ ), в то время как показатель преломления слоев диэлектрика имеет более низкие значения ( $n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 1.76$ ,  $n(\text{SiO}_2) = 1.45$ ). Применение слоев диэлектрика с более высоким показателем преломления приводит к возникновению проблемы вывода света в более низкоиндексные окружающие слои. Таким образом, часть света оказывается запертой в активном слое и

не выводится из него в плоскопараллельной геометрии слоев.

В работе представлены результаты создания светорассеивающего микрорельефа при атомно-слоевом осаждении диэлектрика ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) на пленки наноструктурированного оксида индия-олова.

## 2. Методика эксперимента

В качестве нижнего подслоя использовался наноструктурированный слой оксида индия-олова (ИТО), представляющий собой расположенные преимущественно перпендикулярно к подложке нитевидные нанокристаллы. Слой ИТО наносился методом электронно-лучевого испарения из гранул ИТО (90 wt.%  $\text{In}_2\text{O}_3$  + 10 wt.%  $\text{SnO}_2$ ) на предварительно нагретую до  $550^\circ\text{C}$  подложку из стекла ВК-7. Процесс проводился в вакуумной камере, откачанной до  $5 \cdot 10^{-7}$  mbar, скорость нанесения материала контролировалась по кварцевому датчику составляла 10 nm/min. Расстояние между источником материала и подложкодержателем с образцом составляло 250 mm. Далее образец подвергался отжигу в камере напыления при той же температуре в атмосфере азота ОСЧ при давлении 800 mbar. Далее, слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  наносился методом атомно-слоевого осаждения в установке Picosun P-300B. Нанесение методом атомно-слоевого осаждения происходит циклически при поочередном напуске триметилалюминия (ТМА) и воды. Время напуска реагентов составляло 0.1 s, время откачки — 3 s для ТМА и 5 s для



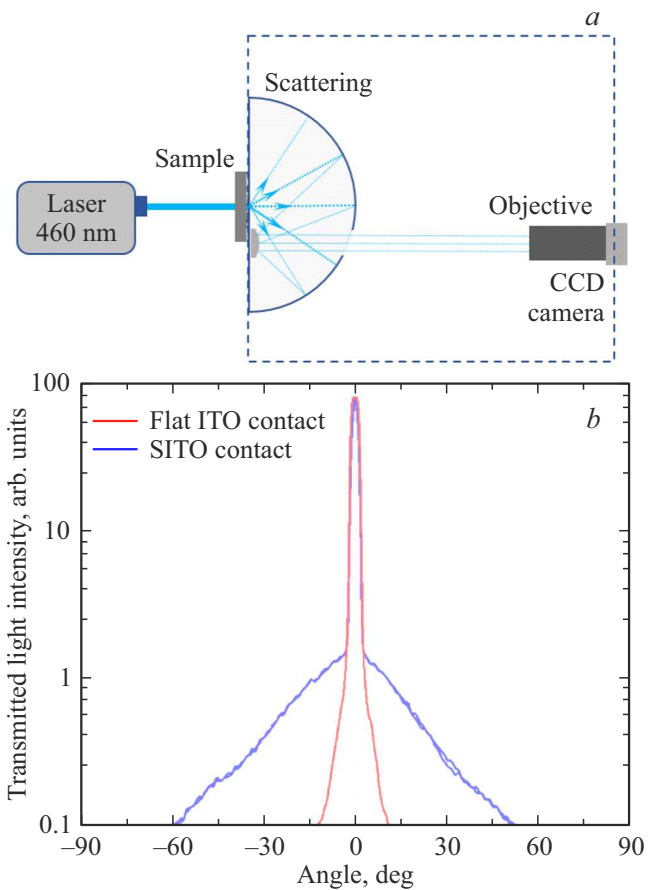
**Рис. 1.** SEM-изображение пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщинами  $a$  — 10 nm,  $b$  — 20 nm и  $c$  — 300 nm, нанесенной поверх наноструктурированного слоя ИТО.

воды. При этом образование пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  происходит послойно на всей поверхности нанокристаллов.

Для получения SEM-изображений плёнок использовался сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-7001F производства JEOL Ltd., Япония. Диаграммы направленности рассеянного излучения исследовались при помощи измерительной системы для контроля пространственного распределения силы света IS-LI™ Luminous Intensity Measurement System (Radiant Imaging).

### 3. Результаты эксперимента и обсуждение

При формировании пленок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  методом атомно-слоевого осаждения на гладкой подложке толщина пленки определяется количеством циклов напуска-откачки реагентов. При нанесении пленок на развитую поверхность наноструктурированной пленки ИТО на начальной стадии за счет высокой удельной поверхности нитевидных нанокристаллов скорость осаждения материала возрастает и итоговая толщина формируемого слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  может значительно отличаться от толщины гладкой пленки при том же количестве циклов напуска-откачки. Поскольку высота нанокристаллов имеет разброс, при осаждении  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поздних стадиях формируется рельеф, образуемый куполообразными выпуклостями на поверхности получаемой пленки с характерным масштабом около 0.5 мкм, что несколько превосходит длину волны видимого излучения в активных слоях электролюминесцентных дисплеев. На рис. 1 приведены SEM-изображения скола образца со сформированными слоями наноструктурированного ИТО и слоями  $\text{Al}_2\text{O}_3$  различной толщины, количество циклов нанесения которых соответствует 10, 20 и 300 nm пленки, наносимой на гладкую подложку. На начальных стадиях (рис. 1,  $a, b$ ) пленка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  покрывает отдельные нитевидные нанокристаллы, не формируя сплошного покрытия. На завершающей стадии (рис. 1,  $c$ ) формируется сплошная пленка с характерным рельефом на поверхности. На приведенном



**Рис. 2.**  $a$  — схема измерения;  $b$  — диаграммы направленности рассеяния света на образцах.

сколе сформированного покрытия можно выделить три области — подслоя ИТО, слой нитевидных нанокристаллов ИТО, заполненный  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также сплошной слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для сравнения рассеивающей способности изготовленных образцов, были измерены диаграммы направленности силы света оптического лазерного излучения, падающего перпендикулярно поверхности образцов.

На рис. 2 приведена схема измерения диаграмм направленности при нормальном падении света на образец со стороны подложки, а также результаты измерения для двух образцов — слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 300 nm, нанесенного на гладкий слой ИТО, а также слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , сформированного в том же процессе нанесения на наноструктурированном подслое ИТО. Основная часть излучения при нормальном падении распространяется без рассеяния для обоих образцов. При этом, интенсивность рассеянного света, проинтегрированная по полусфере, для двух образцов отличается в 5 раз. В случае падения света под углами, большими угла полного внутреннего отражения при выводе света в оптически менее плотную среду, часть излучения, не испытавшая рассеяния, отражается от поверхности, оставаясь в активной области. В плоскопараллельных дисплейных структурах значительная часть света, сгенерированного в активном слое, за счет эффекта полного внутреннего отражения испытывает многократные отражения от границ раздела с окружающими слоями и поглощается. Наличие рассеивающего свет рельефа приводит к перераспределению энергии излучения и повышению эффективности вывода света из активного слоя.

#### 4. Заключение

В представленной работе предложен метод формирования диэлектрических слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , наносимых методом атомно-слоевого осаждения, обладающих микрорельефом с характерным масштабом 0.5  $\mu\text{m}$ . В качестве подслоя для такой пленки применяется проводящий наноструктурированный слой ИТО, методом электронно-лучевого испарения из гранул ИТО на предварительно нагретую подложку. Формирование рельефа на поверхности диэлектрика связано с равномерным ростом пленки на концах наиболее вытянутых нитевидных нанокристаллов. Получаемый рельеф позволяет создать эффективную рассеивающую свет структуру, способствующую повышению эффективности вывода света из активного слоя электролюминесцентного дисплея. Предложенный способ создания рассеивающей свет рельефной поверхности диэлектрика отличается от существующего технологического процесса только режимом нанесения слоя ИТО и не вносит дополнительных технологических операций в процесс изготовления светоизлучающих структур, что позволяет применять его при производстве электролюминесцентных дисплеев и индикаторов повышенной яркости.

#### Финансирование работы

Измерения оптических характеристик рассеяния изготовленных образцов выполнены в ЦКП „Элементная база радиофотоники и наноэлектроники: технология, диагностика, метрология“.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Z. Lin, H. Yang, S. Zhou, H. Wang, X. Hong, G. Li. *Cryst. Growth Des.* **12**, 2836 (2012).
- [2] S. Zhou, H. Hu, X. Liu, M. Liu, X. Ding, C. Gui, S. Liu, L.J. Guo. *Jpn. J. Appl. Phys.* **56**, 111001 (2017).
- [3] L.K. Markov, S.A. Kukushkin, I.P. Smirnova, A.S. Pavlyuchenko, A.S. Grashchenko, A.V. Osipov, G.V. Svyatets, A.E. Nikolaev, A.V. Sakharov, V.V. Lundin, A.F. Tsatsulnikov. *Tech. Phys. Lett.* **48**, 31 (2022).
- [4] L.K. Markov, I.P. Smirnova, M.V. Kukushkin, A.S. Pavlyuchenko. *Semiconductors* **54** (2020).

*Редактор К.В. Емцев*