

УДК: 532.783; 535; 535.3; 535.5; 539.4; 53.04

**Н. В. Каманина^{1,2,*}, А. А. Кухарчик^{1,2}, П. В. Кужаков¹, Ю. А. Зубцова¹,
Р. О. Степанов^{3**}, Н. В. Барышников^{3***}**

**МОДИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ ПРОВОДЯЩЕГО ИТО–СЛОЯ ДЛЯ
ОРИЕНТИРОВАНИЯ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

¹АО «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»,
отдел «Фотофизика сред с нанообъектами»,

Кадетская линия, д. 5, корп. 2, 199053 Санкт-Петербург, Россия. *E-mail: nvkamanina@mail.ru

² Санкт-Петербургский электротехнический университет (ЛЭТИ),
ул. проф. Попова, 5, 197376 Санкт-Петербург, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники,

2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, 105005 Москва, Россия

E-mail: stepanovr@bmstu.ru; *E-mail: baryshnikov@bmstu.ru

Одной из проблем сохранения функциональных свойств жидкокристаллических (ЖК) электрооптических пространственно-временных модуляторов света, а также ЖК-ячеек и аналогов дисплейных элементов, является наличие качественных проводящих контактов, выдерживающих определённые уровни прикладываемых напряжений и световых нагрузок. В настоящей работе проведено исследование механической, лазерной прочности, спектральных и рефрактивных параметров ИТО-проводящих слоев, структурированных углеродными нанотрубками (УНТ), осаждаемых на ИТО-покрытие лазерным бесконтактным методом при варьировании напряженности электрического поля. Приведены как расчетные, так и экспериментальные альтернативные аргументы в пользу применения одностенных УНТ, а также сделаны выводы о преимуществе использования структурированных ИТО в качестве как проводника, так и ориентанта, для ориентирования ЖК-молекул.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, граница раздела сред, рельеф поверхности, ИТО-покрытие, углеродные нанотрубки, лазерный метод осаждения, прочность, глубина проникновения, спектр, поверхностная электромагнитная волна.

DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.109

N. V. Kamanina^{1,2,*}, *A. A. Kukharchik*^{1,2}, *P. V. Kuzhakov*¹, *Yu. A. Zubtcova*¹,
R. O. Stepanov^{3**}, *N. V. Baryshnikov*^{3***}

CARBON NANOTUBES MODIFICATION OF THE CONDUCTIVE ITO-LAYER FOR ORIENTATION OF LIQUID CRYSTALS USED IN ELECTRO-OPTICAL DEVICES FOR INFORMATION PROCESSING

¹ Vavilov State Optical Institute, Laboratory for Photophysics of media with nanoobjects,

Kadetskaya Liniya V.O., 5, korpus 2, 199053 St.- Petersburg, Russia. *E-mail: nvkamanina@mail.ru

² Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Prof. Popova str., 5, 197376 Saint-Petersburg, Russia

³ N. E. Bauman Moscow State Technical University,

Scientific Research Institute of Radioelectronics and laser technology,

2nd Baumanskaya str., 5, stroenie 1, 105005 Moscow, Russia

E-mail: stepanovr@bmstu.ru; *E-mail: baryshnikov@bmstu.ru

One of the important problems saving the functional properties of the liquid crystal (LC) electro-optical spatial light modulators, LC-cells and the analogs of display elements is availability of the qualitative conducting layers that withstand certain levels of applied voltages and light loadings. The mechanical hardness, laser strength, refractive and spectral parameters of the ITO-conducting coating layers structured by carbon nanotubes (CNTs) have been studied. These CNTs have been deposited using contactless laser technique under varying the electric field. Some computational and experimental alternative arguments have been performed in favor of single-walled CNT usage and the conclusions about the benefits of the structured ITO-coatings as a conducting and orienting layer for alignment of LC-molecules have been made.

Key words: *Liquid crystals, interface, surface relief, ITO-coating, carbon nanotubes, laser deposition technique, penetration, hardness, surface electromagnetic waves, spectrum.*

Введение

Среди определенных критических направлений РФ именно «Наноматериалы и нанотехнологии» занимают особое место, так как связанные с ними инновационные разработки эффективно реализуются для оптического приборостроения, космической, лазерной оптики, оптической нано- и микроэлектроники, солнечной энергетики, систем поглощения газов и примесей, а также полезны для дисплейной, телевизионной и биомедицинской техники. Это обусловлено тем, что в большинстве устройств преобразования оптической информации, включая ЖК-системы [1–13], требуется повышенное пропускание оптических элементов, пониженная энергоёмкость, устойчивость к воздействию внешних световых, электрических, акустических и тепловых полей. Одной из проблем, связанной с вышеуказанными, касающихся оптимизации параметров электро- и свето-управляемых жидкокристаллических (ЖК) пространственно-временных модуляторов света (ПВМС), ЖК-дисплейных элементов и ЖК-

визуализаторов био-объектов, является улучшение свойств проводящих контактов на основе гетероструктуры оксидов олова и индия ($\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$, indium-tin oxide) ИТО. Требуется пониженное сопротивление ИТО-контактов (для применения меньших значений управляющего напряжения питания, прикладываемого к межслойным элементам), увеличенное пропускание (так как сама ЖК-мезофаза существенно поглощает в УФ и видимом диапазоне спектра), хорошее оптическое качество, высокая механическая и лазерная прочность, уменьшенная шероховатость поверхности.

В данной работе показаны и проанализированы результаты исследований наноструктурированного покрытия ИТО толщиной 50–100 нм, представляющего собой модифицированный вариант системы проводящего слоя с углеродными нанотрубками (УНТ), внедренными в междоузлия гетероструктуры ИТО, что позволяет существенно менять показатель преломления границы раздела сред и создавать новый эффективный рельеф для ориентации ЖК-диполей.

Экспериментальные условия

Для нанесения углеродных нанотрубок на стеклянную или кварцевую подложку с проводящим ИТО использовался щелевой CO_2 -лазер с управляемым по мощности излучения лазерным лучом. То есть, для модификации свойств ИТО использована система лазерного осаждения углеродных нанотрубок (как одностенных, так и многостенных), которая включала вакуумный пост УВР-2 (УВР-4) и лазер ИК-диапазона на длине волны 10,6 мкм. Лазер

функционировал в непрерывном режиме, мощность составляла ~ 30 Вт, ширина пятна излучения ~ 5 мм, скорость движения пучка при обработке подложек из оптических материалов широкого диапазона спектра составляла $\sim 3 \text{ см} \times \text{с}^{-1}$. Сформированное пятно имело сложную форму – «гребенку». При нанесении углеродных нанотрубок использовалось дополнительное их ориентирование в электрическом поле напряженностью $50\text{--}250 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$. Блок-схема используемой установки показана на рис. 1.

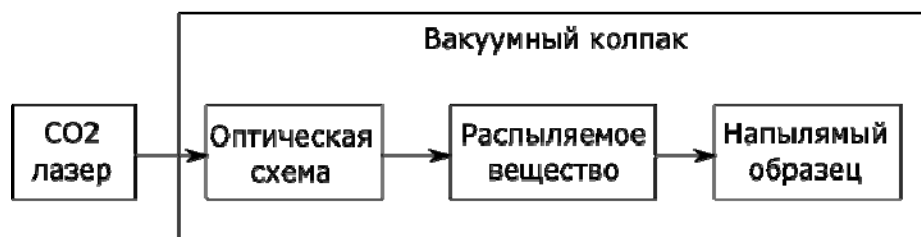


Рис. 1. Блок-схема установки с CO_2 -лазером для осаждения УНТ

Подробно процесс лазерного бесконтактного метода осаждения УНТ на поверхность оптических материалов с последующей обработкой поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) описан ранее в работах [14, 15]. Стоит подчеркнуть, что пленки из ИТО используются для обеспечения подводки к оптическим элементам и приборам, включающим ИТО, напряжения питания, что позволяет, при условии меньших значений сопротивления наноструктурированного покрытия прикладывать существенно меньшие значения управляющего напряжения питания, а также меньшие величины напряженности электрического поля электромагнитной световой волны; следовательно, энергоёмкость большинства электро- и светоуправляемых оптических приборов, как-то: модуляторов света, лазерных конверторов, дисплейных элементов, биомедицинских визуализаторов клеток крови, – оказывается существенно пониженной. Заметим, что в экспериментах по оптимизации поверхности ИТО мы применяли особо чистые УНТ марки 704121-250MG (фирмы Aldrich) с чистотой материала 99,5–99,9 %.

При исследовании спектральных особенностей использовался спектрофотометр СФ-26, а также Фурье-спектрометр «Инфралюм»; рельеф

поверхности изучался с применением атомно-силового микроскопа Solver Next (Зеленоград), АСМ-сканирование проводилось в полуконтактном режиме.

Стоит сказать, что при исследовании механических характеристик слоев ИТО, модифицированных углеродными нанотрубками, применялись классические методы. Так, известно, что классически твердостью (прочностью) называют способность материала сопротивляться проникновению в него другого тела. Твердость оптических материалов характеризуют, как правило, более специфически, учитывая именно способ работы с ними и способ определения самого измеряемого параметра: склерометрическая (твердость при царапании), абразивная (твердость при шлифовании), прочность при истирании), микротвердость (твердость при вдавливании). Итак, были использованы второй и третий методы определения прочностных характеристик.

Механическая прочность на истирание тестировалась на приборе СМ-55 (разработки «ГОИ им. С. И. Вавилова»), где за нулевую прочность принято появление нестираемого кольца на стекле – крон К8 при числе оборотов, равном 3000. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3М (разработки АО «ЛОМО»). Использовался наконечник Кнупа.

Увеличение микроскопа микротвердомера составляло: 130, 500, 800 \times ; пределы координатного перемещения предметного столика микротвердомера находились в двух взаимно перпендикулярных направлениях от 0 до 10 мм, диапазон нагрузки, Н (кгс) составлял от 0,0196 до 4,9. Величина микротвердости определялась делением нормальной нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику, на условную площадь боковой поверхности получаемого отпечатка.

Лазерная прочность измерялась с применением излучения второй гармоники импульсного неодимового наносекундного лазера на длине волны 532 нм; сравнительное измерение показателя преломления на чистой и на наноструктурированной поверхности (с УНТ) проводилось эллипсометром *Horiba Jobin Yvon Uvisel*.

Результаты и обсуждение

Основные анализируемые результаты экспериментов представлены на рисунках 2,4–8.

На рисунке 2 показано существенное изменение пропускания проводящего покрытия ИТО при нанесении УНТ, осаждаемых на подложку при напряженности электрического поля $100 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$.

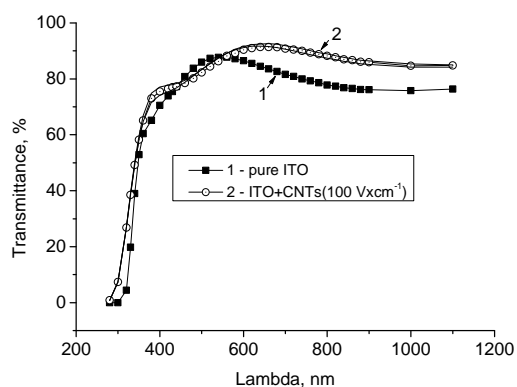


Рис. 2. Изменение пропускания ИТО после нанесения углеродных нанотрубок:

1 – чистый ИТО; 2 – ИТО с углеродными нанотрубками, нанесенными при напряженности электрического поля $100 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$

При модификации границы раздела сред: твердая проводящая пленка ИТО-покрытие из УНТ наблюдается существенное повышение пропускания, связанное с уменьшением потерь Френеля на отражение за счет малого значения показателя

преломления углеродных нанотрубок (на уровне $n = 1,1$), которые осаждаются на ИТО, выравнивая показатели преломления материалов в целом.

Этот процесс обуславливается встраиванием трудноразрушимых алмазоподобных С–С связей углеродных нанотрубок в междузлия гетероструктуры пленок ИТО. Строгое, практически, вертикальное встраивание углеродных нанотрубок в поверхность подложки (отклонение от вертикали составляло не более 20 градусов) обеспечивается их выравниванием в электрическом поле. Заметим, что технология лазерного осаждения УНТ позволяет варьировать величину прикладываемой напряженности электрического поля, при этом глубина проникновения УНТ в приповерхностные слои материала, на который происходит осаждение, существенно меняется. Довольно сложно провести расчет глубины проникновения УНТ в приповерхностные слои ИТО, поэтому было проведено моделирование для системы Si-УНТ. Это было сделано для упрощения расчетов и наглядной визуализации эффекта внедрения УНТ в оптический материал на основе кремния, атомные связи которого хорошо известны. На рис. 3 показана расчетная зависимость глубины проникновения УНТ от их диаметра и скорости.

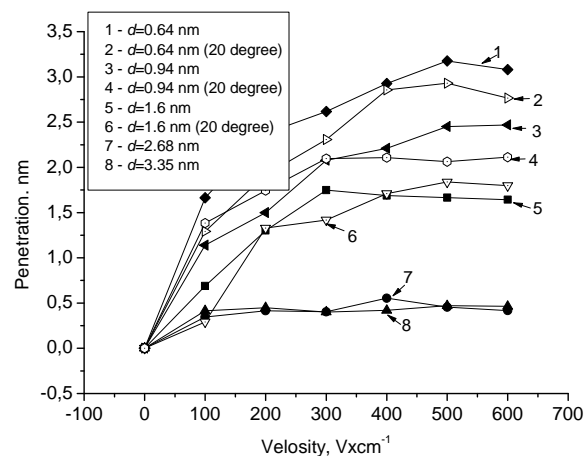


Рис. 3. Результат расчета глубины проникновения УНТ в приповерхностные слои модельной системы Si с учетом разного диаметра d УНТ, ее разной скорости и угла наклона при осаждении на поверхность материала

Использовался метод классической молекулярной динамики, реализованный в программном пакете *LAMMPS* [16]. Для описания взаимодействия между нанотрубкой и кремниевой подложкой был выбран потенциал Терсоффа [17]. Кремниевая

подложка состояла из ~ 19000 атомов и имела толщину около 4 нм. Выбранная толщина являлась оптимальной для того, чтобы избежать сквозного проникновения трубки. Молекулярная динамика была проведена при постоянной температуре 300 К. Полное время моделирования составляло 60 пс с шагом в 1 фс. Скорости нанотрубок варьировались от 100 до $600 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$, согласно экспериментальным данным. На рис. 3 представлен результат расчета, который, по нашим представлениям, должен коррелировать и с процессом проникновения УНТ в приповерхностные слои сложной гетероструктуры ИТО. Заметим, что проведенные расчеты подтверждают не только изменение спектральных и рефрактивных параметров изучаемого материала, но и объясняют существенное увеличение микротвердости и лазерной стойкости, что будет показано далее.

Дополнительным аргументом в поддержку утверждения, что УНТ, определенно, внедряются в приповерхностные слои оптического материала при лазерном их осаждении с варьируемой напряженностью электрического поля, вызывая изменение границы раздела сред, следовательно, и ее рефрактивных параметров, является изучение сравнительного эффекта изменения показателя

преломления чистого ИТО на стеклянной подложке из стекла крон К8 и слоя ИТО с углеродными нанотрубками на аналогичной подложке. На рис. 4 представлены данные, полученные при использовании классического метода эллипсометрии, по изменению показателя преломления, показывающие, что в области длин волн 350–520 нм уменьшение показателя преломления при наноструктурировании ИТО составило $\sim 20\%$ с последующим выравниванием рефрактивных параметров в области длин волн 520–900 нм.

Для более детального изучения рельефа поверхности ИТО, модифицированного углеродными нанотрубками, использовался атомно-силовой анализ. АСМ-снимок представлен на рис. 5. Рассматривался участок поверхности размером 10×10 микрометров. Получена довольно однородная поверхность границы раздела сред: ИТО-УНТ, которая в последствии обрабатывалась поверхностной электромагнитной волной при использовании CO_2 -лазера на длине волны 10,6 микрометров. АСМ-картина, показанная на рис. 6, отражает результат обработки ПЭВ. Применение ПЭВ позволяет еще более уменьшить шероховатость поверхности и создать, практически, идеальный рельеф для ориентирования ЖК-молекул при сборке ЖК-ячеек и ЖК-ПВМС.

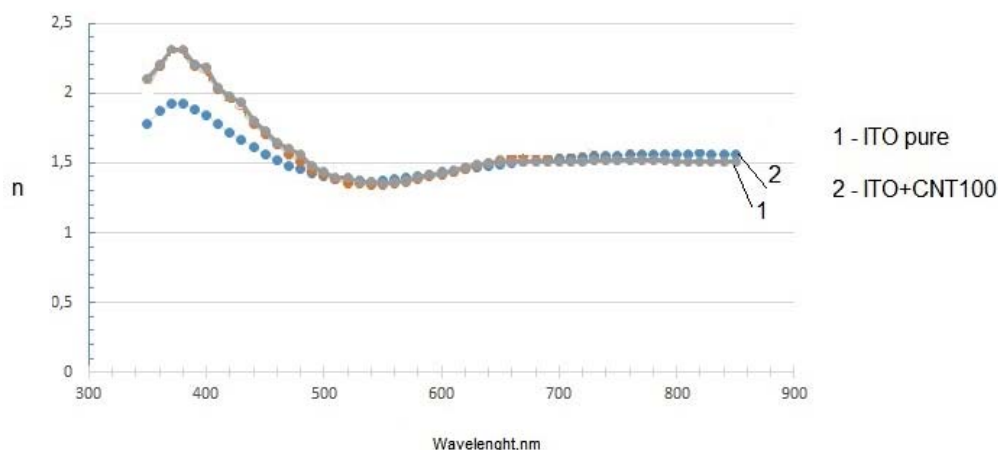


Рис. 4. Сравнительный график изменения (уменьшения) показателя преломления для чистого ИТО и для ИТО с нанесенными углеродными нанотрубками при напряженности электрического поля $100 \text{ В} \times \text{см}^{-1}$:

- 1 – спектральная зависимость показателя преломления для чистого ИТО;
- 2 – спектральная зависимость показателя преломления для ИТО с нанесенными УНТ

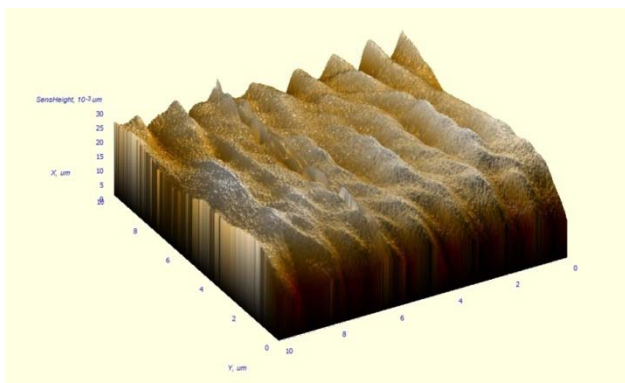


Рис. 5. Визуализация рельефа поверхности ИТО с нанесенными углеродными нанотрубками

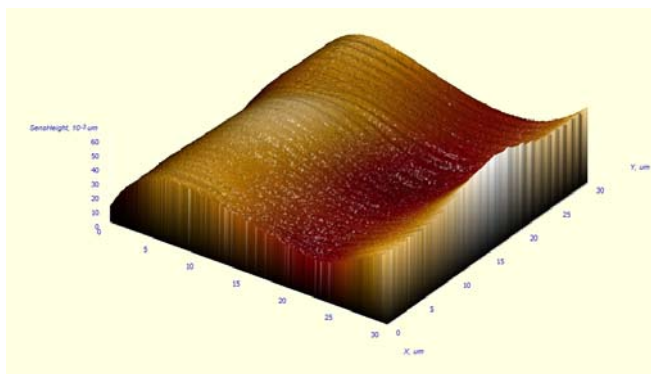


Рис. 6. Визуализация рельефа поверхности ИТО с нанесенными углеродными нанотрубками с последующей обработкой ПЭВ

Стоит подчеркнуть, что при создании такого рельефа структурированный проводящий слой ИТО выполняет две функции, а именно: ориентирующего слоя и проводника. Таким образом, уменьшается число технологических операций, задействованных при конструировании ЖК-устройств, поскольку нет, например, необходимости использовать полиимидные высокоомные ориентирующие покрытия, которые предполагают применение токсичных растворителей и дополнительной методики по натирке ориентантов или их облучения УФ-источником.

Дополнительно были проведены эксперименты по изучению угла смачиваемости поверхности, структурированной УНТ. Был сформирован слой покрытия из мелких неоднородностей размером сотни нанометров, поскольку использовались углеродные нанотрубки правильной формы с диаметром 0,7–1,1 нм и 10–30 нм по длине нанотрубок, то ожидалось увеличение угла смачиваемости, а значит, повышение влагостойкости. Прогнозируемый результат показан на рис. 7. Видно, что изменение угла смачиваемости составило 8–10°.

Обращает на себя внимание следующее существенное обстоятельство. Найденный и опробованный метод модификации поверхности ИТО позволил наблюдать эффект значительного изменения сопротивления проводящих контактов, причем последнее изменялось от 1,5 до 5 раз. На рис. 8 представлена сравнительная диаграмма значений сопротивления ИТО-контактов до и после нанесения УНТ.



Рис. 7. Значения углов смачивания для чистого ИТО (слева, значения угла смачивания ~76–78°); и для слоя ИТО с нанесенными углеродными нанотрубками (справа, значения угла смачивания составляют ~86–87°)



Рис. 8. Сравнительные данные по изменению сопротивления ITO-слоя до (темные столбцы) и после нанесения углеродных нанотрубок (светлые столбцы)

По-видимому, модифицируемая граница раздела фаз: твердая проводящая пленка ITO-покрытие из УНТ за счет внедрения углеродных нанотрубок в междоузлия гетероструктуры ITO приводит в результате к пониженному сопротивлению, во-первых, за счет большого потока электронов с остова углеродных нанотрубок, что обеспечивает увеличение проводимости, во-вторых, за счет проявления донорно-акцепторных свойств самих углеродных нанотрубок, что, возможно, способствует образованию квази-графенового слоя также с повышенной проводимостью.

Параллельно были выполнены эксперименты по проверке механической и лазерной прочности проводящих контактов ITO до и после их структурирования углеродными нанотрубками при их лазерном осаждении на поверхность исследуемого оптического материала. В таблице 1 показаны данные по изменению лазерной стойкости покрытий до и после обработки углеродными нанотрубками, а также ПЭВ. Определен диапазон изменения плотности энергии, при которой пропускание образцов

остается постоянным, разрушения не регистрируется (второй столбец табл. 1); приведено число импульсов при конкретной величине воздействующей плотности энергии, при которой начинает происходить разрушение ITO-слоя с контролем уменьшения его пропускания на 10 % (третий столбец табл. 1); показан диапазон значений плотностей энергии, при которых начинается разрушение проводящего слоя с контролем изменения пропускания на 10–30 % (четвертый столбец табл. 1).

Увеличение механической прочности на истирание было зарегистрировано для ITO-покрытий, структурированных за счёт осаждения вертикально ориентированных УНТ. Данные представлены в табл. 2. Анализируя данные табл. 2, можно сказать, что механическая прочность ITO при обработке УНТ, тестируемая с применением метода на истирание поверхности оптического материала, увеличилась более чем в 3 раза.

Аналогичные результаты измерения микротвердости для чистого и модифицированных УНТ и ПЭВ образцов ITO представлены в таблице 3.

Таблица 1. Результаты исследования лазерной прочности ИТО-покрытий

Тип слоя и обработки	Плотность энергии, Дж·см ⁻²	Число лазерных импульсов до разрушения образца при конкретном уровне плотности энергии, Дж·см ⁻²	Плотность энергии, разрушающая слой, Дж·см ⁻²
Чистый ИТО	0,35–0,5	10 при 0,66 Дж·см ⁻²	0,65–0,67
ИТО с обработкой ПЭВ	1,025–1,05	7–10 при 1,25 Дж·см ⁻²	1,25
ИТО, покрытый окислами HfO ₂ *	0,375–0,6	10 при 0,7 Дж·см ⁻²	0,67–0,7
ИТО, покрытый HfO ₂ , с последующей обработкой ПЭВ	0,88–1,06	7–10 при 1,2 Дж·см ⁻²	1,18–1,25
ИТО, покрытый УНТ	0,4–0,7	10 при 0,75 Дж·см ⁻²	0,75
ИТО, покрытый УНТ, с последующей обработкой ПЭВ	0,94–1,25	10 при 1,5 Дж·см ⁻²	1,5–1,56**

* Традиционно, покрытия на основе оксидов гафния используются для улучшения однородности поверхности и сглаживания отдельных дефектов на оптических элементах.

** Независимые эксперименты, проведенные в Институте Лазерной Физики (АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»), показали еще большее увеличение данного параметра, вплоть до 1,7 Дж·см⁻²

Таблица 2. Результаты исследований механической прочности проводящих контактов ИТО методом на истирание поверхности

Материал	Механическая (абразивная) прочность, число оборотов на истирание
ИТО	600
ИТО + нанобработка	2000***

*** При регистрации нулевой прочности для эталона – силикатного стекла крон К8 – при применении данной методики истирания поверхности регистрируется 3000 оборотов до появления отчетливого кольца

Таблица 3. Сравнительные данные по микротвердости

Тип образца	Микротвердость, ×10 ⁹ Па	Увеличение микротвердости (раз), в сравнении с чистым ИТО
ИТО	2,2–2,4	0
ИТО+УНТ	3,5	1,5
ИТО+УНТ+ПЭВ	4,2–48	1,9–2

Итак, два метода измерения механической прочности образцов ИТО, структурированных углеродными нанотрубками, как-то: метод на истирание поверхности и классический метод измерения микротвердости, подтвердили эффект ее увеличения.

Таким образом, применение лазерной технологии просветления и упрочнения материалов углеродными нанотрубками с сопутствующим эффектом изменения сопротивления довольно показательно, перспективно и подтверждено рядом альтернативных экспериментов и расчетов. Особо стоит обратить внимание, что подобный наноструктурированный рельеф вполне заменяет

высокоомные полиимидные ориентирующие слои (разница в удельном сопротивлении полиимида и ЖК составляет ~3 порядка, соответственно, большая доля прикладываемого напряжения падает на ориентирующий слой, повышая общее значение напряжения питания) и позволяет снизить управляющее напряжение питания с 50–60 В до 22–30 В, то есть, практически, в 2 раза при работе с идентичными нематическими ЖК-ячейками с толщиной мезофазы ~10 микрон. Более того, для ЖК-ячеек с наноструктурированным ИТО возможно снизить амплитуду напряжения питания вплоть до 10 В, применив следующий режим: к ЖК-ячейке прикладывается

частотно модулированное переменное напряжение прямоугольной формы с амплитудой питающего напряжения от ± 4 В до ± 10 В. Форма частотной модуляции является также прямоугольной. Частота управляющего напряжения для включения ячейки может варьироваться от 200 Гц до 1000 Гц, а частота для выключения ячейки может изменяться в пределах от 50 кГц до 1 МГц. При использовании указанного режима обеспечивается практически стопроцентный контраст и приемлемые времена переключения.

Заключение

Проведя анализ проделанной исследовательской работы и полученных в ходе нее результатов, можно сделать следующие выводы:

1) проводящие покрытия на основе ИТО вполне аргументированно могут быть модифицированы лазерно-осаждаемыми углеродными нанотрубками, что позволяет изменять рефрактивные параметры границы раздела сред: ИТО-покрытие – углеродные нанотрубки;

2) структурирование ИТО углеродными нанотрубками, определенно, приводит к повышению прозрачности проводящего материала ИТО, что позволяет существенно расширить области его применения;

3) структурирование ИТО углеродными нанотрубками, действительно, приводит к понижению сопротивления проводящих контактов, следовательно, снижает уровень управляющего напряжения питания, прикладываемого к оптоэлектронным компонентам, в которых применяется слой ИТО. Таким образом, энергоемкость устройств с использованием данных промежуточных слоев возможно уменьшить;

4) структурирование ИТО углеродными нанотрубками позволяет повысить лазерную и механическую прочность проводящих контактов, следовательно, определяет возможность применения промежуточных слоев ИТО в лазерных системах преобразования оптической информации, где используются световые нагрузки с высокой плотностью энергии или интенсивности электромагнитных волн;

5) структурирование ИТО углеродными нанотрубками, а также последующая обработка поверхностной электромагнитной волной позво-

ляет создавать инновационный рельеф для ориентирования ЖК-диполей, что возможно рассматривать как альтернативный метод в сравнении с *MWVA-technology*.

6) структурирование ИТО углеродными нанотрубками априори позволяет снизить число слоев в сэндвич структуре ЖК-ячеек и модуляторов света, нивелируя непосредственный ориентирующий слой, скажем, при применении натертых полимерных или напыленных окисных ориентантов, поскольку слой ИТО в данном случае выполняет две функции: ориентанта и проводника;

7) проведенные расчеты по глубине проникновения углеродных нанотрубок в приповерхностные слои модельного материала Si, размеры межатомных связей которого и их энергии хорошо известны, позволяют предположить, что уменьшение диаметра УНТ приводит к более существенному их влиянию на поверхность оптических материалов, преломляя таковые расчеты и на систему ИТО-УНТ. Увеличение глубины проникновения с уменьшением диаметра УНТ объясняет изменение рефрактивных и существенное увеличение прочностных характеристик, с одной стороны, за счет малого значения показателя преломления УНТ, с другой стороны, за счет высокого значения их модуля Юнга;

8) установленное и проанализированное изменение рефрактивных параметров ИТО-слоя, модифицированного углеродными нанотрубками, определенно прогнозирует создание органических жидкокристаллических фотонных кристаллов, поскольку создаваемая граница раздела сред: ЖК-твердая подложка с УНТ должна существенно влиять и на саму ЖК-мезофазу, изменяя ее энергетическую систему уровней и показатель преломления;

9) представленное усовершенствование рельефа поверхности раздела между ЖК-мезофазой и проводящим контактом при использовании технологии структурирования ИТО-слоя углеродными нанотрубками, подтвержденное многократными альтернативными экспериментальными и расчетными методами, позволяет расширить области использования ЖК-ячеек и ЖК-модуляторов света, что является немаловажным фактором при коммерциализации технических инновационных продуктов.

Благодарности

Авторы благодарят д-ра тех. наук профессора В. В. Беляева (МГОУ, Москва) за полезное обсуждение полученных результатов, а также выражают признательность д-ру физ.-мат. наук П. Б. Сорокину (Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, Троицк) и Д. Г. Кваинину (МИСИС, Москва) за помощь в проведении квантово-механических расчетов. Авторы признательны своим зарубежным коллегам: профессору Francois Kajzar и профессору Chantal Andraud (Лион, Франция) за частичное обсуждение предлагаемых моделей и конкретных полученных экспериментальных результатов на международных конференциях и семинарах.

Исследования выполнены при частичной поддержке гранта РФФИ, № 13-03-00044 (2013–2015), а также международного гранта по рамочной программе FP7, Marie Curie International researchers exchange proposal «BIOMOLEC» (2011–2015).

Список литературы / References

- Berreman D. W. Optics in stratified and anisotropic media: 4x4 formulation // Opt. Soc. Am. 1972. Vol. 62. P. 502–510.
- de Gennes P. G. The Physics of Liquid Crystals. Oxford University Press, Oxford, 1974.
- Grebenkin M. F., Seliverstov V. A., Blinov L. M., Chigrinov V. G. Properties of nematic liquid crystals with positive dielectric anisotropy // Soy. Phys. – Crystallogr. 1975. Vol. 20. P. 604–607.
- Adamczyk A., Strugański Z. Liquid Crystals. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warsaw, 1976 [in Polish].
- Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, гл. редакция физ.-мат. литературы, 1978. 384 с. [Blinov L. M. Elektro- i magnitooptika zhidkikh kristallov (Electrooptics and Magnetooptics of Liquid Crystals). Moscow, Nauka, 1978. 384 p. (in Russian)].
- Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфёнов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с. [Vasilev A. A., Casasent D., Kompanets I. N., Parfenov A. V. Prostranstvennye modulyatory (Spatial Light Modulators). Moscow, Radio i Svyaz', 1987. 320 p. (in Russian)].
- Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука, 1994. 214 с. [Zharkova G. M., Sonin A. S. Zhidkokristallicheskie kompozity (Liquid crystals compounds). Novosibirsk: Nauka, 1994. 214 p. (in Russian)].
- Gruneisen M. T., Wilkes J. M. Compensated imaging by real-time holography with optically addressed spatial light modulator // OSA TOPS. 1997. Vol. 14. P. 220–226.
- Tsoi V. I., Tarasishin A. V., Belyaev V. V., Trofimov S. M. Modelling the diffraction of light by structures with spatial periodicity of the optical parameters of the substance and of the surface relief // Journal of Optical technology. 2003. Vol. 70. P. 465–469.
- Motevalizadeh L., Khorshidifar M., Ebrahimzadeh Abrishami M., Bagheri Mohagheghi M. M. Nanocrystalline ITO-Sn₂S₃ transparent thin films for photoconductive sensor applications // J. Mater Sci: Mater Electron. 2013. Vol. 24. P. 3694–3700.
- Sarac Umur, Celalettin Baykul M. Characterization of nanocrystalline Ni–Cu thin films electrodeposited onto ITO coated glass substrates: effect of pretreatment current density // J. Mater Sci: Mater Electron. 2013. Vol. 24. P. 2777–2784.
- Sujatha Lekshmy S., Joy K. Structural and optoelectronic properties of indium doped SnO₂ thin films deposited by sol gel technique // J. Mater Sci: Mater Electron. 2014. Vol. 25. P. 1664–1672.
- Jiwen Xu, Zupei Yang, Xiaowen Zhang, Hua Wang, Huarui Xu. Grain size control in ITO targets and its effect on electrical and optical properties of deposited ITO films // J. Mater Sci: Mater Electron. 2014. Vol. 25. P. 710–716.
- Пат. 2355001 РФ (RU 2 355 001 C2). Оптическое покрытие на основе углеродных нанотрубок для оптического приборостроения и наноэлектроники / Каманина Н. В., Васильев П. Я.; приоритет от 09.01.2007; зарегистр. 10.05.2009. [Pat. № 2355001 (RU 2 355 001 C2). Opticheskoe pokrytie na osnove ughlerodnykh nanotrubok dlya opticheskogo priborostroeniya i nanoelektroniki / Kamanina N. V., Vasil'ev P. Ya.; prioritet 09.01.2007; zaregistr. 10.05.2009. (in Russian)].
- Пат. 2405177 РФ (RU 2 405 177 C2). Оптическое покрытие на основе ориентированных в электрическом поле углеродных нанотрубок для оптического приборостроения, микро- и наноэлектроники при нивелировании границы раздела сред: твердая подложка – покрытие / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студёнов В. И.; приоритет 23.12.2008; зарегистр. 27.11.2010. [Pat. № 2405177 (RU 2 405 177 C2). Opticheskoe pokrytie na osnove orientirovannykh v elektricheskom pole ughlerodnykh nanotrubok dlya opticheskogo priborostroeniya, mikro- i nanoelektroniki pri nivelirovanii granitsy razdela sred: tverdaya podlozhka – pokrytie / Kamanina N. V., Vasil'ev P. Ya., Studenov V. I.; prioritet 23.12.2008; zaregistr. 27.11.2010. (in Russian)].
- Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J. Comput. Phys. 1995. Vol. 117. P. 1–19.
- Tersoff J. Modeling solid-state chemistry: Interatomic potentials for multicomponent systems // Phys. Rev. 1989. B. 39. P. 5566–5568.

Поступила в редакцию 15.08.2015 г.