

06.2

Динамическое рассеяние света в жидкокристаллических ячейках с микроструктурами металл–диэлектрик–полупроводник, содержащими золотые наночастицы

© Д.П. Щербинин, Л.П. Амосова, А.Е. Большакова, Е.А. Коншина

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия
E-mail: shcherbinin.dmitrij@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 2 апреля 2019 г.

Принято к публикации 4 апреля 2019 г.

Показана возможность снижения порога эффекта динамического рассеяния света в жидкокристаллических ячейках. Снижению порога способствует использование электродов с микроструктурами металл–диэлектрик–полупроводник, содержащими золотые наночастицы. Повышение эффективности электродов приводит к увеличению проводимости ячеек и ослаблению интенсивности света в области низких напряжений.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, динамическое рассеяние света, золотые наночастицы.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.13.47949.17821

Поиск способов управления ослаблением оптического излучения в широкой области спектра с высоким контрастом, быстродействием и поляризационной независимостью является актуальной проблемой современных фотонных устройств. Эффект динамического рассеяния света (ДРС) в жидких кристаллах (ЖК, LC) позволяет управлять ослаблением света в видимой и ИК-областях спектра [1–5].

Существенно возросший в последние годы интерес к исследованиям динамического рассеяния света связан с перспективностью его применения. Была показана возможность ослабления интенсивности света до пяти порядков, правда при очень высоких напряжениях и на довольно большом расстоянии (1 м) от рассеивающей плоскости [1]. Достигнуты малые времена оптической релаксации — до 22.5 ms для массивов тонких светорассеивающих ЖК-ячеек [2]. Показано влияние параметров электрического поля на времена переключения в рассеивающих ячейках [3]. Продемонстрирована возможность селективной аттенюации в рассеивающих ячейках в видимой и ИК-областях спектра [4]. Исследуются альтернативные подходы, в том числе свету управляемые гидродинамические нестабильности в ЖК [6].

Преимуществом эффекта ДРС по сравнению с ориентационным эффектом Фредерикса является его поляризационная независимость. Необходимость использования поляризаторов усложняет оптические схемы и приводит к существенным потерям световой интенсивности (до 50% на каждом поляризаторе). ДРС в нематическом жидком кристалле вызвано электрогидродинамической неустойчивостью, возникающей в результате противодействия процессов переориентации директора и протекания ионного тока при приложении напряжения к ЖК-ячейке [1–5].

Основной недостаток ЖК-структур, работающих в режиме динамического рассеяния, — высокие рабочие напряжения. Снижение рабочих напряжений сделает такие поляризационно-независимые ограничители излучения значительно более конкурентоспособными.

Давно известны типы ненакаливаемых катодов на основе автоэлектронной эмиссии из структур металл–диэлектрик–металл (вариант: хорошо проводящий полупроводник–диэлектрик–металл) и из гранулированных пленок металлов на диэлектрической подложке. Известно, что нанокристаллы любого вещества обладают меньшей работой выхода, чем массивные образцы того же вещества. Это происходит из-за того, что горячие электроны с энергией больше работы выхода не теряют ее в результате рассеяния на фонах, так как фонный спектр в наночастицах дискретен и фононы с „необходимой для рассеяния электрона“ энергией в нем в большинстве случаев отсутствуют. В то же время встает проблема доставки электронов в наночастицы металла. Традиционно таким источником является поперечное по отношению к тянущему электрическое поле. Пленка наносится между двумя заранее созданными электродами. В этом случае через пленку при определенных напряжениях начинает течь туннельный ток. Совместив эти две структуры, получим катод, в котором на проводящий электрод (например, оксид индия-олова, ИТО) напыляется достаточно тонкая (до 50 nm) сплошная пленка диэлектрика (например, кварца), поверх которой наносится гранулированная пленка золота. В итоге получается матрица микродиодов Шоттки [7]. Подобные структуры можно использовать в качестве одного из электродов ЖК-ячейки, работающей на основе эффекта динамического рассеяния.

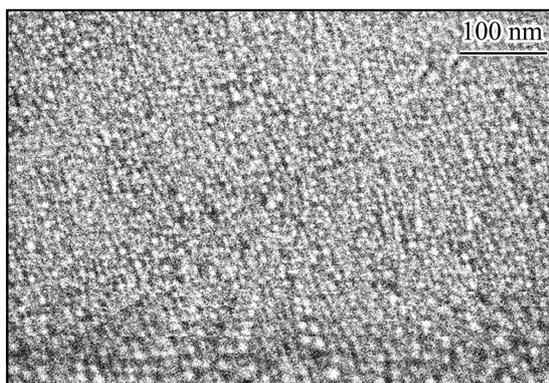


Рис. 1. СЭМ-изображение золотой островковой пленки.

Оптический порог ЖК-ячеек в режиме динамического рассеяния света

Номер ячейки	Структура ячейки	Оптический порог, V
1 (контрольная)	ITO/SiO ₂ /LC/Chr/ITO	4
2	ITO/SiO ₂ /Au/LC/Chr/ITO	0
3	ITO/SiO ₂ /Au/LC/ITO	0

В настоящей работе исследованы зависимости пропускания и проводимости от напряжения ЖК-ячеек, содержащих структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП), с использованием гранулированных золотых пленок на межфазной границе с целью получения ослабления пропускания при низких напряжениях.

Для проведения исследований использовался нематический жидкий кристалл ЖК-440 (НИОПИК, Москва) с отрицательной диэлектрической анизотропией $\Delta\epsilon = -0.4$ и анизотропией электропроводности $\Delta\sigma = +1.55$. Плоскопараллельные ячейки собирались из стеклянных подложек, покрытых прозрачными проводящими слоями ITO. В качестве контрольной ячейки использовалась гибридно-ориентированная ячейка № 1 (см. таблицу). Параллельная ориентация ЖК-молекул на одной из подложек задавалась с помощью поликристаллической пленки SiO₂, а вертикальная ориентация на противоположной подложке — слоем хромолана (Chr). В ячейках № 2 и 3 на слой SiO₂ осаждалась золотая гранулированная пленка. Эти ячейки различались тем, что у ячейки № 2 противоположный электрод был покрыт ориентирующим слоем хромолана, а у ячейки № 3 ориентирующий слой отсутствовал (см. таблицу). Толщина ячеек, заданная с помощью тefлоновых прокладок, контролировалась емкостным методом и составляла $18 \pm 1 \mu\text{m}$.

Слой ITO наносился на подложки путем катодного распыления в аргоновой плазме с последующим отжигом слоев на воздухе при температуре 450°C. Удельное сопротивление слоев ITO (около $200 \Omega/\square$) было значительно меньше сопротивления ЖК, что позволяло

не учитывать его при проведении измерений и анализе данных. Ориентирующие слои хромолана осаждались центрифугированием его раствора в изопропиловом спирте с помощью спин-коатера APT Spin-150i NPP. После осаждения эти слои подвергались термообработке в течение часа при температуре 120°C. Тонкие пленки диоксида кремния получались путем лазерного распыления кварцевой мишени в вакуумной установке „ФерриВатт“. Гранулированная золотая пленка наносилась термическим распылением в вакууме на установке Kurt Lesker, а затем отжигалась при 200°C. Изображение структуры гранулированной золотой пленки, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), показано на рис. 1. Она состоит из плотноупакованных золотых наночастиц диаметром порядка 10 nm.

Зависимости ослабления пропускания от напряжения в видимой области спектра измерялись на спектро-

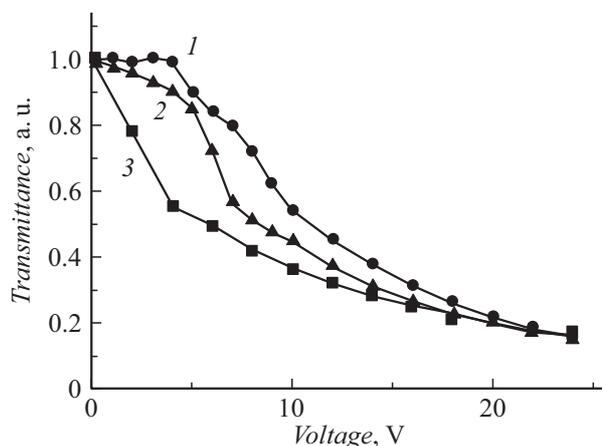


Рис. 2. Зависимость пропускания ЖК-ячеек от напряжения в режиме динамического рассеяния света. 1 — контрольная ячейка, 2 — ITO/SiO₂/Au/LC/Chr/ITO, 3 — ITO/SiO₂/Au/LC/ITO.

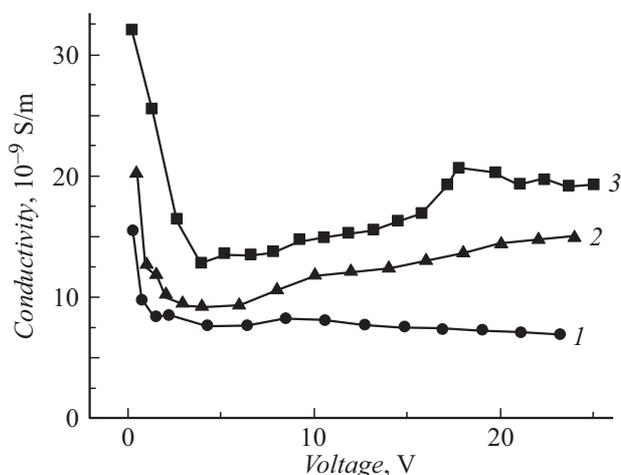


Рис. 3. Зависимость проводимости ЖК-ячеек от напряжения. 1 — контрольная ячейка, 2 — ITO/SiO₂/Au/LC/Chr/ITO, 3 — ITO/SiO₂/Au/LC/ITO.

фотометре СФ-56 (ЛОМО, Санкт-Петербург, Россия). Расстояние между плоскостью образца и фотодетектором составляло 20 см. К ЖК-ячейкам прикладывалось постоянное напряжение. Для измерения проводимости ЖК-ячеек и контроля их толщины использовался прецизионный измеритель импеданса Agilent E4980A (Keysight Technologies, США).

На рис. 2 приведены зависимости пропускания ЖК-ячеек от постоянного напряжения. На электрод с золотыми наночастицами подавался „минус“, т. е. он являлся катодом. В отличие от ячейки № 1 в ЖК-ячейках № 2 и 3 с золотыми наночастицами на межфазной границе наблюдался спад пропускания с увеличением приложенного напряжения без явно выраженного порога. Это можно объяснить увеличением стационарной проводимости ЖК-ячеек.

На рис. 3 приведены зависимости проводимости ЖК, рассчитанные из вольт-амперных характеристик исследуемых ячеек. У ЖК-ячейки № 3 с резким спадом пропускания в области напряжений до 5 В (рис. 2) проводимость была практически в 2 раза больше, чем у контрольной ячейки № 1. Это свидетельствует о том, что при использовании МДП-структуры Au/SiO₂/ITO в качестве катода проводимость ЖК-ячейки увеличивается за счет снижения работы выхода из наночастиц Au на поверхности электрода и дополнительной эмиссии электронов. Носители заряда туннелируют от полупроводникового электрода ITO к Au-наночастицам через слой SiO₂ с последующей инжекцией в ЖК-среду. Для нематических ЖК характерна ионная проводимость, поэтому инжектируемые электроны приводят к ионизации ЖК-среды. Экстракция зарядов из ЖК происходит на противоположном инжектирующем электроде (аноде). Слой хромолана на электроде в ЖК-ячейке № 2 привел к понижению проводимости, затрудняя процесс экстракции зарядов (рис. 3). В отсутствие слоя хромолана в ЖК-ячейке № 3 ее проводимость существенно увеличивалась благодаря стеканию зарядов с электрода. Подтверждением инжекции электронов в ЖК в присутствии Au-наночастиц на межфазной границе является тот факт, что при смене полярности наблюдалось существенное уменьшение проводимости и, как следствие, увеличение пропускания ячейки (просветления) [8].

Для дальнейшего усиления интенсивности рассеяния при малых напряжениях проводимость ЖК должна быть существенно выше. Возникновение вращающих моментов для ЖК-молекул происходит при определенной силе ионных токов. Отсюда и нижний предел проводимости ЖК, при котором возникает рассеяние. Если мы понижаем рабочее напряжение в n раз, то для сохранения той же силы тока, согласно закону Ома, мы должны во столько же раз увеличить концентрацию исходных примесей в ЖК. Выбор химической природы допирующего вещества и расчет его необходимой концентрации с целью усиления эффективности рассеяния в области низких напряжений могут служить предметом дальнейших научных исследований в данном направлении.

Результаты исследований ЖК-ячеек с гранулированными золотыми пленками на межфазной границе показали возможность снижения рабочих напряжений для эффекта динамического рассеяния света в ЖК. Использование матрицы МДП-диодов ITO/SiO₂/Au на одной из подложек ЖК-ячейки (катоде) способствовало ослаблению пропускания в результате электрогидродинамической неустойчивости практически без порога при низких напряжениях постоянного поля.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Geis M.W., Bos P.J., Liberman V., Rothschild M. // *Opt. Express*. 2016. V. 24. N 13. P. 3812–13823. DOI: 10.1364/OE.24.013812
- [2] Serak S.V., Hrozhyk U., Hwang J., Tabiryay N.V., Steeves D., Kimball B.R. // *Appl. Opt.* 2016. V. 55. N 30. P. 8506–8512. DOI: 10.1364/AO.55.008506
- [3] Konshina E.A., Shcherbinin D.P. // *Liq. Cryst.* 2018. V. 45. N 2. P. 292–302. DOI: 10.1080/02678292.2017.1323353
- [4] Chiang S.P., Wang C.T., Feng T.M., Li C.C., Jau H.C., Su S.Y., Yang S.D., Lin T.H. // *Opt. Express*. 2018. V. 26. N 13. P. 17009–17014. DOI: 10.1364/OE.26.017009
- [5] Пожидаев Е.П., Мудрецов Д.А., Шошин В.М., Бобылев Ю.П., Жуков А.А., Веселаго В.Г. // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39. В. 11. С. 45–51.
- [6] Zhan Y., Schenning A.P., Broer D.J., Zhou G., Liu D. // *Adv. Funct. Mater.* 2018. V. 28. N 21. P. 1707436 (1–7). DOI: 10.1002/adfm.201707436
- [7] Елинсон М.И. *Ненакаливаемые катоды*. М.: Сов. радио, 1974. 336 с.
- [8] Амосова Л.П., Бойков Д.С., Щербинин Д.П. // *ЖТФ*. 2017. Т. 87. В. 9. С. 1376–1383.