1–184.

ОПТИЧЕСКИЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИМЕР-ПЕРОВСКИТНЫХ КОМПОЗИТОВ

У.Е. Гога, В.С. Будник, А.А. Позняк

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь;
u.turovets@bsuir.by

Цель

Перовскиты привлекают особое внимание исследователей благодаря огромному потенциалу использования в фотопреобразователях – они отличаются высокой эффективностью и экономичностью производства [1]. Ключевым направлением работ остается создание способов инкапсуляции нанокристаллов перовскитов – приемом для сохранения их функциональных свойств в стабильном состоянии. Среди полимерных матриц особое место занимают целлюлоза и ее производные – в частности, нитроцеллюлоза (НЦ). К ее преимуществам относят широкую доступность, умеренную стоимость, отсутствие токсичности и способность к биоразложению и биосовместимость. Благодаря сочетанию НЦ с диметилсуль-

фоксидом (ДМСО) удается разрабатывать новые протоколы получения композитов: при этом достигается качественное диспергирование компонентов и обеспечивается точный контроль морфологии при формировании функциональных слоев.

Материалы и методы

Инкапсулированные частицы $CsPbI_3$ получали методом замены растворителя на основе следующих реактивов: растворитель – ДМСО, поверхностно-активные вещества – додециламин (*DDA*) и олеиновая кислота (*OA*), в качестве антирастворителя – этилацетат (*EA*). Мольное соотношение прекурсоров Cs:Pb = 2:1; 500 мкл прекурсорного раствора по каплям добавляли в 5 мл этилацетата (*EA*), в котором предварительно был растворен 1% (от кол-ва сухих реагентов) НЦ. Центрифугирование для отделения более крупных частиц и непрореагировавших компонентов проводили при 3500 об/мин в течение 15 мин. Методом *drop-coating* сформированы сплошные композитные пленки $CsPbI_3$ в матрице НЦ.

Морфология была исследована с помощью оптического микроскопа МКИ 2М при увеличении ×500, а также с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе *Hitachi S*-4800. Оптические спектры снимали на спектрофотометре *MC*-122 (ООО *SOL Instruments*, Беларусь) в области длин волн 330–1100 нм.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) полимер-перовскитных композитов были зарегистрированы при комнатной температуре с использованием монохроматора МДР-23У, оснащенного фотоумножителем *R*9110 (*Hamamatsu, Japan*), в спектральном диапазоне 200–850 нм. Для возбуждения ФЛ применялся непрерывный твердотельный лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм с мощностью 80 мВт. Плотность мощности на образце составила около 2 Вт·см$^{-2}$.

Рентген-дифракционный спектр (РДС) был получен на установке ДРОН 3 М, подключенной к ПК с помощью аналогово-цифрового преобразователя, позволившего регистрировать результаты в цифровом виде, с использованием CuK_α излучения и графитового фильтра с шагом 0,04° и экспозицией продолжительностью 2 с в каждой точке.

Результаты и обсуждение

В результате анализа изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и оптической микроскопии (рис. 1, а, б), выявлена неоднородность морфологии и наличие трех типов структурных элементов: полидисперсные проволоки (толщина 30–845 нм, длина 3–21 мкм), веерные кластеры (30–50 мкм) и фрагментированные области с пористыми наногубками. Высокая оптическая толщина слоя (около 30 мкм) и сильное геометрическое рассеяние света на микронных вискерах обусловливают практически полную непрозрачность образца в видимом диапазоне (пропускание < 5 %). За счет использования полимерной матрицы скол демонстрирует бездефектную структуру, харак-теризующуюся отсутствием пустот.

На РДС (рис. 2, б) доминируют рефлексы орторомбической желтой неперовскитной δ-фазы (главный пик $2\theta = 26{,}5°$), тогда как характеристический пик черной модификации (γ-фазы) в районе $2\theta = 28{,}3°$ находится на уровне шума, что указывает на ее следовые объемы.

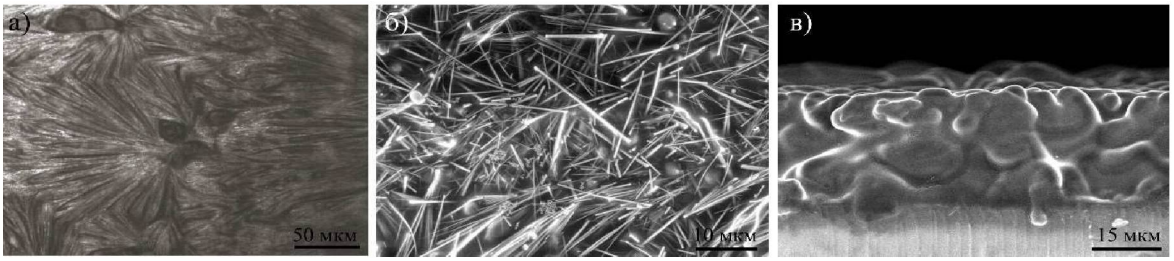


Рис. 1. **Оптические (а) и СЭМ изображения (б) поверхности полимер-перовскитных композитов, и СЭМ изображение скола (в)**

При отсутствии выраженных рефлексов γ-фазы, в спектрах фотолюминесценции (ФЛ) присутствуют два сигнала (рис. 2, а): узкий интенсивный пик с λ_{max} = 700 нм (*FWHM* = 34 нм) и широкий компонент с λ_{max} = 595 нм. Высокая интенсивность пика γ-фазы (700 нм) при ее со-держании ниже предела обнаружения дифракционными методами обусловлена миграцией эк-ситонов из широкой зоны поглощения δ-матрицы вискеров в редкие включения черного перов-скита. Высокоэнергетический компонент полосы ФЛ на 595 нм (≈ 2,08 эВ) обусловлен кван-тово-размерным эффектом на перемычках наногубок (размер меньше радиуса Бора ≈ 4,6 нм).

«Провал» интенсивности ФЛ в интервале 640–660 нм вызван реабсорбцией оранжевого свечения хвостами Урбаха диспергированной в матрице черной γ-фазы.

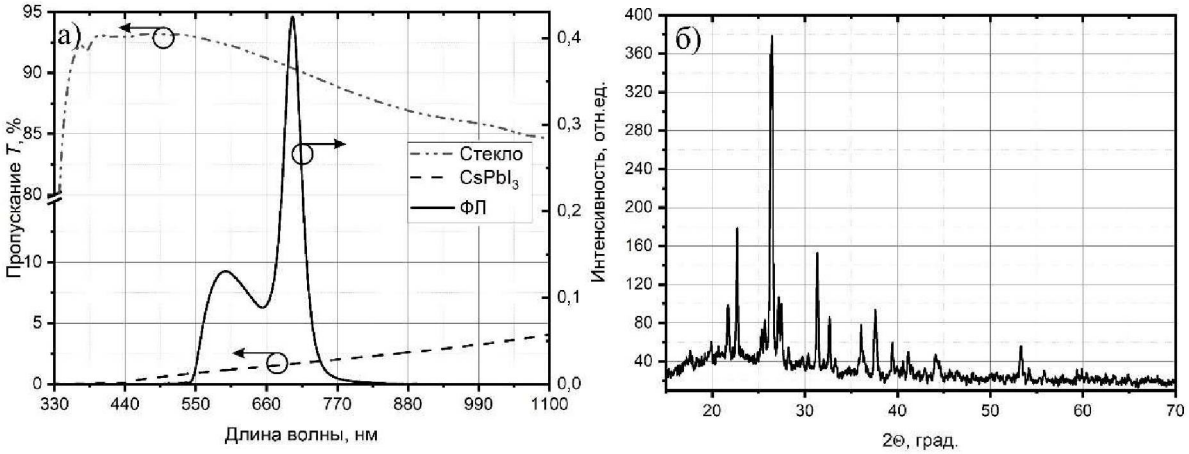


Рис. 2. **Оптическое пропускание и спектр ФЛ (а) и РДС полученного полимер-перовскитного композита (б)**

Заключение

Создание перовскит-полимерных композитов на основе на основе производных цел-люлозы обеспечивает пространственное разделение фаз перовскита, подтвержденное дан-ными ФЛ-спектроскопии (пики на 595 нм и 700 нм), свидетельствует о неоднородности роста кристаллитов в условиях ограниченной диффузии в полимерной матрице.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РБ (гранты № 26-3086 М и № 26-3090 М) и ГПНИ 2026–2030 «Фотоника и микроэлектроника», задание 5.3.09.

1. Listorti A. Colella S., Petrozza A. Perovskite Solar Cells and Light Emitting Diodes: Materials Chemistry, Device Physics and Relationship // Chemical Reviews. — 2025 (**125**), № 10, 5521—5560.