

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Ле Тхай Шона на тему «**Slot – die печатные перовскитные солнечные элементы с p-i-n архитектурой**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники», состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 16.06.2022 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 11.04.2022 г., протокол № 1.

Диссертация выполнена в лаборатории перспективной солнечной энергетики (ПСЭ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Диденко Сергей Иванович, заведующий кафедрой полупроводниковой электроники и физики полупроводников НИТУ «МИСиС», ведущий эксперт лаборатории ПСЭ.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 1 от 11.04.2022 г.) в составе:

1. Ховайло Владимир Васильевич – д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» – председатель комиссии;
2. Мухин Сергей Иванович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ «МИСиС»;
3. Пархоменко Юрий Николаевич – д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности Гиредмет»;
4. Лагов Петр Борисович – д.ф.-м.н., профессор, начальник отдела научного центра сертификации элементов и оборудования АО «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем», ГК «Роскосмос»;
5. Якимов Евгений Борисович – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией локальной диагностики полупроводниковых материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук.

В качестве ведущей организации утверждено Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, г. Москва.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработан полный цикл нанесения четырех функциональных слоев ПСЭ методами слот-матричной печати и вакуумного испарения, включая дырочно-транспортный слой на основе компактного NiO_x , фото-активный слой на основе гибридных

перовскитов и электронно-транспортные слои – PCBM (метанофуллерен)/VSP (батокупроин).

- определены оптимальные составы раствора-прекурсора для слот-матричной печати перовскитных слоев в качестве фотоактивного слоя ПСЭ с разными составами: $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ и мультикатионный, исследованы добавки из хлоридных катионов, улучшающих морфологию и оптоэлектронные свойства напечатанных перовскитов.
- разработана конструкция ПСЭ со структурой ИТО/ NiO_x / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /PCBM/VSP/Cu при использовании различных конфигураций дырочно-транспортного слоя NiO_x (компактный слой и слой из наночастиц), позволяющая получать КПД устройства более 30 % в условиях низкой интенсивности света.
- показана высокая стабильность устройств на основе печатного перовскита $\text{Cs}_{0,2}\text{FA}_{0,8}\text{PbI}_3$ с КПД, остающимся более 90% начального значения после 105 дней.
- определены численные параметры дефектов в фотопреобразователях с мультикатионным составом методами нестационарной спектроскопии глубоких уровней с электрическим возбуждением (DLTS) и оптическим возбуждением (ODLTS). Обнаружен донорный уровень с энергией на 0,2 эВ ниже зоны проводимости перовскита. Два других глубоких уровня ловушки обнаружены с энергиями 0,57 и 0,74 эВ. Первый уровень связан с ловушкой для дырок, а второй - с ловушкой для электронов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Установлено влияние хлор-содержащих катионных добавок ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl}$; $\text{HC}(\text{NH}_2)_2\text{Cl}$) в растворе перовскита, используемых в печатном методе нанесения слоев, на повышение выходных параметров устройств. Оптимальным содержанием хлор-содержащих прекурсоров является 10 %, в результате чего увеличивается плотность тока короткого замыкания и, следовательно, улучшается эффективность на 5 %.
- Разработана конструкция ПСЭ со структурой ИТО/ NiO_x / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /PCBM/VSP/Cu при использовании различных конфигураций дырочно-транспортного слоя NiO_x (компактный слой и слой из наночастиц), позволяющая получать КПД устройства более 30 % в условиях низкой интенсивности света от 100 до 1000 люкс.
- В ПСЭ на основе $\text{Cs}_x(\text{MA}_{0,17}\text{FA}_{0,83})_{(1-x)}\text{Pb}(\text{I}_{0,83}\text{Br}_{0,17})_3$ определены глубокие уровни ловушек с энергиями 0,57 эВ для дырок и 0,74 эВ для электронов

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработан технологический процесс полного цикла слот-матричной печати ПСЭ с p-i-n архитектурой с КПД свыше 17 % для перовскитов с дополнительным содержанием хлора ($(\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Cl} - \text{MACl}$ и $\text{HC}(\text{NH}_2)_2\text{Cl} - \text{FACl}$).
- разработан процесс масштабирования технологии слот-матричной печати ПСЭ с p-i-n архитектурой с площадью от 0,14 до более 2 см².
- достигнут показатель эффективности преобразования света в энергию в диапазоне от 24 до 30 % в планарной P-I-N ПСЭ при низкой интенсивности света от 100 до 1000 люкс.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- достоверность научных результатов подтверждается использованием современных методик исследования, аттестованных измерительных установок и приборов, согласованностью результатов, полученных различными методами;

Личный вклад автора в настоящую работу состоит в постановке целей и задач, непосредственном участии в лабораторных экспериментах, в том числе в разработке методики изготовления образцов, проведении экспериментальных измерений, обработке, анализе и оценке полученных результатов измерений.

Материалы диссертации Ле Тхай Шона опубликованы в 3 печатных работах в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и базы Web of Science/Scopus, представлены тезисы 4 докладов на конференциях.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Ле Тхай Шона соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», так как в ней на основании выполненных автором исследований содержится решение задачи разработки состава чернил и технологии полного цикла слот-матричной печати перовскитных солнечных элементов с p-i-n архитектурой, разработан процесс масштабирования технологии печати ПСЭ с площадью от 0,14 см² до более 2 см², а также определены зависимость выходных характеристик ПСЭ от интенсивности падающего света и численные параметры дефектов в фото-поглощающих слоях ПСЭ. Полученные в работе результаты имеют важное научное значение и являются перспективными в решении практических задач.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Ле Тхай Шону ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.3 – «Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники».

При проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 4 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 4, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



В.В. Ховайло

16.06.2022