

**ПОВЕРХНОСТНАЯ СТРУКТУРА И СВЕТОПРОПУСКАНИЕ
ХЛОРЗАМЕЩЕННЫХ МЕТАЛЛОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТОВ,
ЛЕГИРОВАННЫХ RNH_3^+ КАТИОНАМИ**

В. С. Будник, И. А. Врублевский

*Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, г. Минск*

Демонстрируются результаты исследований структуры и светопропускания хлор-замещенного металлоорганического перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$ в ходе легирования аммониевыми катионами состава RNH_3^+ .

Ключевые слова: металлоорганические перовскиты, аммониевые катионы, светопропускание.

**SURFACE STRUCTURE AND LIGHT TRANSMISSION
OF CHLORINE-SUBSTITUTED ORGANOMETALLIC PEROVSKITES
DOPED WITH RNH_3^+ CATIONS**

V. S. Budnik, I. A. Vrublevsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

This paper presents the results of a study of the structure and light transmission of a chlorine-substituted organometallic perovskite of the composition $CH_3NH_3PbI_2Cl$ upon doping with ammonium cations of the composition RNH_3^+ .

Keywords: organometallic perovskites, ammonium cations, light transmittance.

Солнечные элементы на основе металлоорганических перовскитов широко исследуются благодаря их высокой эффективности и относительно недорогому процессу изготовления. Для получения высококачественных тонких пленок перовскита важным процессом является контролируемая кристаллизация, которая позволяет уменьшить количество структурных дефектов. Амины могут сильно координироваться с ионами свинца и поэтому имеют большие перспективы для управления ростом кристаллитов в пленке перовскита [1].

Цель работы – изучение влияния введения RNH_3^+ катионов на морфологию и светопропускание пленок хлорзамещенного металлоорганического перовскита состава $CH_3NH_3PbI_2Cl$.

Методика эксперимента. Пленки толщиной 0,8–1,0 мкм были получены центрифугированием (500 об/мин) с последующим отжигом при $T = 100$ °С в течение 5 минут. Раствор перовскита получали смешиванием CH_3NH_3Cl с PbI_2 (молярное соотношение 1:1) в диметилформамиде, катионы фениламмония (в соли анилина) и этилендиаммония (концентрации соответствующих иодидаммониевых солей 30 г/л) добавляли при перемешивании. Спектры светопропускания снимались на спектрофотометре МС-122 в области длин волн (λ) 380–1000 нм. Морфология поверхности модифицированных пленок перовскита была исследована с помощью оптического микроскопа МКИ-2М.

Пленки исходного перовскита (60 г/л) и с добавкой йодида аммония имели черный цвет. Образец без легирования состоял из мелких квадратных кристаллитов 3,40–6,30 мкм с редкими промежутками между ними. Отдельные микрокристаллы собирались в частицы округлой формы диаметром до 9,0 мкм (рис. 1, а). Темно-

серые пленки с катионом фениламмония имеют крупные кристаллиты листовидной формы размерами до 200 мкм (рис. 1, б). Катион этилендиаммония приводит к образованию красновато-черной зернистой практически сплошной (с мелкими единичными пустотами) пленки с размером частиц 0,92–1,37 мкм, объединенных в чешуевидные агломераты (рис. 1, в).

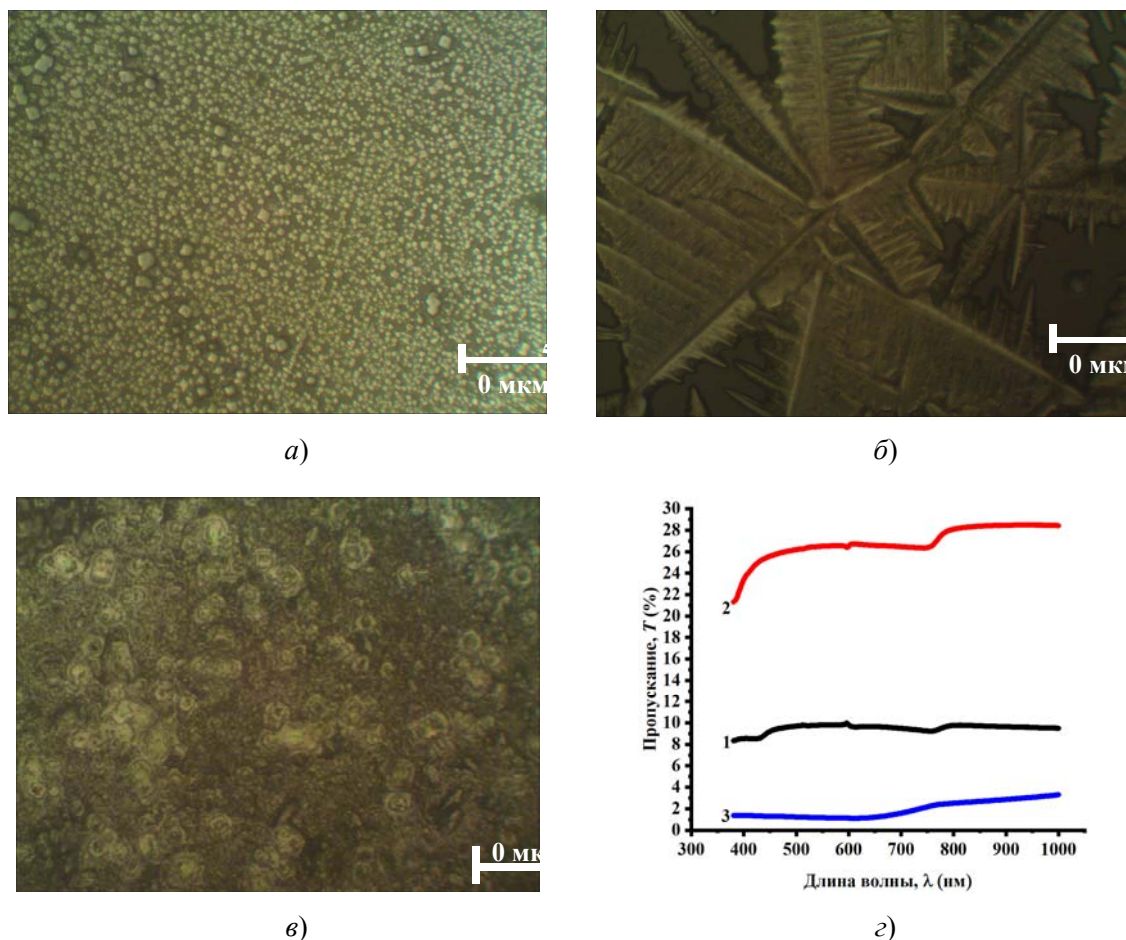


Рис. 1. Структура исходного перовскита (а), модифицированного катионами фениламмония (б) и этилендиаммония (в), спектры пропускания перовскитов (г)

Исследование оптических свойств исходного образца выявляет повышение значений светопропускания до $T = 10\%$ при длине волны $\lambda = 596$ нм, сменяющееся неравномерным изменением (рис. 1, г, кривая 1). Пленка перовскита с катионом фениламмония отличается крайне высоким значением светопропускания во всем исследуемом диапазоне длин волн, что связано с крупными размерами и количеством межкристаллитных промежутков, не задействованных в преобразовании света (рис. 1, г, кривая 2). До достижения желтой области при 608 нм происходит рост светопропускания, сопровождаемый двумя небольшими пиками с дальнейшими перегибами при 512 и 598 нм ($T = 26,24$ и $26,41\%$ соответственно), затем небольшое уменьшение до перегиба на длине волны 746 нм с дальнейшим ростом и достижением плато при 910 нм во всей инфракрасной области спектра со значением пропускания $28,48\%$. Введение в перовскит катиона этилендиаммония приводит к значительному снижению светопропускания, значения которого не превышают $3,30\%$, чему способствует практически полное отсутствие пустот в пленке (рис. 1 г, кривая 3).

Модификация металлоорганического хлорзамещенного перовскита при помощи катиона этилендиаммония приводит к повышению качества покрытий за счет создания практически сплошной зернистой структуры. Светопропускание модифицированных перовскитных пленок понижается во всей области видимого спектра. Такие изменения структуры и катионного состава перовскитов благоприятно воздействуют на оптические свойства и эффективность перовскитных солнечных элементов.

Литература

1. Xie, J. Modulating MAPbI₃ perovskite solar cells by amide molecules: Crystallographic regulation and surface passivation / J. Xie // Journal of Energy Chemistry. – 2020. – Vol. 56, № 7. – P. 20–26.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ЗАТУХАНИЯ И РЕФРАКЦИИ РАДИОВОЛН В ТРОПОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И ДАННЫХ РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМ

И. А. Зелинский, В. А. Федоренко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Представлен анализ ключевых физических механизмов – затухания и рефракции радиоволн в тропосфере – с использованием количественных моделей рекомендаций ИТУ-Р и данных эксплуатации реальных тропосферных систем, включая отечественные станции «Гроза» и историческую ТРРЛ «Север». Показано, как атмосферное поглощение, влияние осадков и градиенты показателя преломления определяют надежность и дальность связи. Особое внимание уделено практическим аспектам прогнозирования условий распространения и адаптации параметров современных систем к изменяющейся тропосферной обстановке. Результаты подчеркивают важность интеграции радиометеорологических моделей в проектирование и эксплуатацию тропосферных линий связи для обеспечения их устойчивой работы в сложных климатических условиях.

Ключевые слова: тропосферная связь, затухание радиоволн, рефракция, тропосферные замирания, «Гроза», ИТУ-Р.

ANALYSIS OF ATTENUATION AND REFRACTION MECHANISMS OF RADIO WAVES IN THE TROPOSPHERE BASED ON QUANTITATIVE MODELS AND DATA FROM REAL-WORLD SYSTEMS

I. A. Zelinskiy, V. A. Fedorenko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

The paper presents an analysis of key physical mechanisms – attenuation and refraction of radio waves in the troposphere – using quantitative models from ITU-R recommendations and operational data from real-world tropospheric communication systems, including the domestic “Groza” stations and the historical “Sever” tropospheric radio relay line (TRRL). It demonstrates how atmospheric absorption, precipitation effects, and refractivity gradients determine the reliability and range of communication links. Particular emphasis is placed on practical aspects of propagation condition forecasting and adaptive adjustment of modern system parameters to the dynamically changing tropospheric environment. The results highlight the critical importance of integrating radiometeorological models into the design and operation of tropospheric communication links to ensure their robust performance under challenging climatic conditions.

Keywords: tropospheric communication, radio wave attenuation, refraction, tropospheric fading, “Groza”, ITU-R.