

Imię i nazwisko: Wiktor Żuraw

Dyscyplina naukowa: nauki fizyczne

Streszczenie rozprawy doktorskiej „Development of lead-reduced perovskite photovoltaics”

Perowskitowe ogniwa słoneczne są najbardziej obiecującą technologią spośród ogniw słonecznych trzeciej generacji i najbardziej wydajnymi ogniwami słonecznymi wytwarzanymi mokrymi technikami powlekania. Największą ich zaletą jest niskoenergetyczny koszt produkcji oraz możliwość wytwarzania na lekkich i elastycznych podłożach. Obecnie prowadzone badania są skoncentrowane na perowskitowych ogniwach słonecznych na bazie ołowiu, które są najbardziej stabilne i wydajne spośród eksplorowanych. Chociaż to one oferują duży potencjał pod kątem efektywnych technologii, to toksyczność ołowiu jest jednym z czynników utrudniających komercjalizację tych rozwiązań i stwarza realne problemy związane z ich późniejszym gospodarowaniem i utylizacją. Zminimalizowanie zawartości ołowiu w wytworzonych urządzeniach jest preferowanym podejściem w celu zmniejszenia potencjalnej ekspozycji na ołów. W niniejszej rozprawie doktorskiej zbadano dwie główne strategie minimalizacji zawartości ołowiu: (i) redukcja grubości perowskitu oraz (ii) zastąpienie ołowiu nietoksyczną cyną. Kolejnym wyzwaniem w komercjalizacji perowskitowych ogniw słonecznych jest fakt, że środowisko naukowe koncentruje się głównie na zwiększeniu wydajności konwersji energii ogniw o małej powierzchni ($\sim 0,1 \text{ cm}^2$) wykonanych na sztywnych podłożach, które są dalekie od możliwości wprowadzenia na rynek. W niniejszej rozprawie przeprowadzono badania nad rozwojem elastycznych perowskitowych ogniw słonecznych i modułów o dużej powierzchni ($\geq 1 \text{ cm}^2$) dla różnych składów perowskitu.

Pierwszy rozdział stanowi krótkie wprowadzenie do technologii perowskitowych ogniw słonecznych, przedstawiając ich teoretyczny opis, zasadę działania oraz najważniejsze właściwości. W rozdziale drugim omówiona została problematyka toksyczności perowskitów na bazie ołowiu, w tym potencjalny wpływ perowskitów na środowisko oraz kwestie zdrowotne. Przeanalizowano również główne wyzwania związane z perowskitami cynowymi, które są główną alternatywą dla perowskitów ołowiowych. Rozdziały trzeci i czwarty zawierają przegląd technik osadzania i charakteryzacji stosowanych w części eksperymentalnej. Część eksperymentalna składa się z serii trzech publikacji i jednego zgłoszenia patentowego, z których wszystkie koncentrują się na rozwoju i optymalizacji wytwarzania perowskitowych ogniw słonecznych o obniżonej zawartości ołowiu.

Pierwszy rozdział eksperymentalny (rozdział 5) opisuje redukcję zawartości ołowiu poprzez zmniejszenie grubości warstwy perowskitu. Okazuje się jednak, że wytwarzanie bardzo cienkich, jednorodnych warstw perowskitu jest dużym wyzwaniem ze względu na naprężenia obecne w wytworzonych warstwach, co może prowadzić do generowania nieciągłości prowadzących do zmniejszenia wydajności ogniw słonecznych. W pracy zaprezentowano działające ogniwo słoneczne z najcieńszą jak dotąd warstwą perowskitu uzyskaną za pomocą techniki powlekania obrotowego. Wyprodukowane ogniwa zawierają do 50 razy mniej ołowiu niż standardowe. Zmniejszając grubość pozostałych warstw, uzyskano półprzezroczyste

perowskitowe ogniwa słoneczne, których obszar zastosowań znacznie wykracza poza obecnie dostępne nieprzezroczyste ciężkie ogniwa krzemowe.

Druga praca (rozdział 6) koncentruje się na fundamentalnym problemie szybkiego utleniania się jonów Sn^{2+} do Sn^{4+} , co prowadzi do niskiej stabilności perowskitów na bazie cyny. Przedstawiono w niej nową metodę syntezy jodku cyny(II), kluczowego prekursora do produkcji perowskitów cynowych. Otrzymany tusz perowskitowy i warstwy perowskitowe charakteryzowały się znacznie wyższą czystością i stabilnością w porównaniu do komercyjnych prekursorów. Osiągnięto to poprzez wyeliminowanie zanieczyszczeń jonami Sn^{4+} , które mają wpływ na degradację materiału i w konsekwencji zmniejszają wydajność ogniwa słonecznego. W pracy zademonstrowano również elastyczne perowskitowe ogniwo słoneczne na bazie cyny o powierzchni aktywnej 1 cm^2 . Opracowana metoda poprawiła wydajność i stabilność wytworzonych ogniw, co stanowi kolejny krok w kierunku rozwoju technologii perowskitów bezołowiowych.

Trzecia publikacja (rozdział 7) przedstawia pierwsze w historii doniesienie na temat perowskitowego modułu słonecznego na bazie cyny wykonanego za pomocą skalowalnej techniki powlekania raklowego. Wynik ten został osiągnięty dzięki kompleksowemu podejściu, które obejmowało optymalizację składu perowskitu, udoskonalenie procesu jego osadzania oraz poprawę krystalizacji poprzez zastąpienie powszechnie stosowanej warstwy transportującej dziury na jej bezwodny odpowiednik. Ważną częścią pracy była również optymalizacja procesu ablacji laserowej, która umożliwiła połączenie elektryczne między sąsiednimi ogniwami w module. Najlepszy moduł osiągnął sprawność konwersji energii na poziomie 5,7% na powierzchni całkowitej modułu wynoszącej 25 cm^2 .

Ostatni rozdział części eksperymentalnej (rozdział 8) dotyczy zgłoszenia patentowego rozszerzającego metodę przedstawioną w rozdziale 6. Opisana metoda pozwala na otrzymywanie różnych soli halogenków metali, a także perowskitowych tuszy oraz proszków. Warstwy perowskitu przygotowane z roztworu prekursorów, wytworzonego przy użyciu halogenków metali zsyntezowanych zgodnie z przedstawioną metodą, charakteryzują się brakiem lub zmniejszoną ilością zanieczyszczeń w porównaniu do konwencjonalnej syntezy lub komercyjnie dostępnych prekursorów.

Niniejsza praca ma na celu dalszy rozwój zrównoważonej fotowoltaiki, pokazując, że perowskitowe ogniwa i moduły słoneczne o obniżonej zawartości ołowiu mogą być produkowane na dużą skalę, co daje im realny potencjał komercjalizacji. Udowodniona zostanie hipoteza, że perowskitowe ogniwa słoneczne i moduły o dużej powierzchni o znacznie zredukowanej zawartości ołowiu mogą być z powodzeniem wytwarzane dzięki odpowiedniej inżynierii tuszu perowskitowego.