

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Cichoszewskiego

pt. „Optymalizacja warunków trawienia chemicznego krzemu ze wspomaganie katalizatora metalicznego w zastosowaniu do krzemowych ogniw słonecznych”

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Cichoszewskiego została przygotowana w języku angielskim i zatytułowana jako ‘Optimization of metal assisted chemical etching of silicon for application in silicon solar cells’, z uwagi na to, że większość badań została przeprowadzona w laboratoriach zagranicznych (w RFN).

Rozprawa przedstawia wyniki kilkuletnich badań Autora mających na celu zwiększenie sprawności krzemowych ogniw słonecznych poprzez opracowanie oryginalnej metody trawienia chemicznego służącej do teksturyzacji powierzchni, z użyciem katalizatora w postaci cząstek metalu (palladu), i prowadzącej do zmniejszenia strat związanych z odbiciem światła od powierzchni ogniwa, a tym samym zwiększenia jego sprawności.

Rozprawa jest dość obszerna (ok. 170 stron) i składa się z 9 rozdziałów, poprzedzonych tekstem wstępnym (abstrakty i motywacja) i zakończonych podsumowaniem, wykazem skrótów i oznaczeń oraz obszernej bibliografii, liczącej 173 pozycje, w tym 5, których współautorem (z czego w 4 – pierwszym autorem) jest mgr inż. J. Cichoszewski.

Pewnym mankamentem abstraktów jest, wg mnie, niepełna informacja o sprawności otrzymanych ogniw; mianowicie Autor podaje o ile wzrosła ich sprawność (o $\Delta\eta = 0,4\%$), natomiast nie informuje o bezwzględnej wartości tej sprawności.

Pierwsze cztery rozdziały rozprawy mają charakter przeglądu literaturowego i opisują odbicie światła od powierzchni krzemu o różnej morfologii (rozd. 1), metody chemiczne (rozd. 2) i elektrochemiczne (rozd. 3) teksturyzacji powierzchni krzemu, a także aktualny stan technologii trawienia chemicznego ze wspomaganie katalizatora metalicznego (rozd. 4). O ile rozdz. 2 – 4 świadczą o dużej wiedzy Autora w zakresie metod teksturyzacji powierzchni krzemu, to rozdz. 1 budzi pewne zastrzeżenia. Mianowicie, Autor chyba

niepotrzebnie pisze o całkowitym wewnętrznym odbiciu, które nie zachodzi przy przejściu światła z otoczenia (o małym współczynniku załamania; $n_i = 1$ dla powietrza) do krzemu ($n_{Si} = 3,42$), z czym mamy do czynienia w przypadku ogniw słonecznych. Ponadto, wzór (1.3) na str. 15 (z powołaniem się na klasyczny podręcznik optyki [8]!) na kąt graniczny Θ_T (kąt padania odpowiadający kątowni załamania 90°), co miałyby sens przy przejściu światła z krzemu do otoczenia, jest błędny; winno oczywiście być $\sin\Theta_T = n_i/n_{Si}$.

W rozdz. 5, stanowiącym eksperymentalną część pracy, Autor opisał materiały wyjściowe, sposób wytwarzania ogniw słonecznych oraz metody ich charakteryzowania. Materiałem wyjściowym był krzem taśmowy ('string ribbon silicon') wytwarzany w firmie Sovello (RFN), natomiast rys. 5.2 (str. 53) ilustrujący sposób wytwarzania tego krzemu dotyczy firmy Evergreen Solar (USA).

W następnych rozdziałach, Autor przedstawił wyniki szczegółowych badań obejmujące użycie palladu jako katalizatora (rozd. 6), trawienie krzemu w roztworze wodnym HF i HNO₃ (rozd. 7) oraz zastosowanie opracowanej metody trawienia chemicznego z udziałem katalizatora metalicznego (MAE – metal assisted etching) w procesie wytwarzania ogniw słonecznych z krzemu taśmowego, zarówno w skali laboratoryjnej (rozd. 8), jak i przemysłowej w firmie Sovello (rozd. 9). Teksturyzacja metodą MAE, w połączeniu ze standardową procedurą nanoszenia warstwy antyrefleksyjnej SiN_x, pozwoliła na znaczne obniżenie odbicia od powierzchni ogniw słonecznych, a tym samym na zwiększenie ich sprawności.

Dla ogniw laboratoryjnych, Autor podaje, że ten wzrost, dzięki metodzie MAE, wyniósł średnio $\Delta\eta = 0,4\%$ (nie podano na jakiej próbie) w porównaniu do ogniw nieteksturowanych, natomiast nie podaje bezwzględnej wartości sprawności. Obserwowany wzrost sprawności Autor przypisuje wzrostowi prądu zwarcia ogniwa (J_{SC}) i szkoda, że w tak obszernej pracy nie ma ani jednej, przykładowej charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa słonecznego, otrzymanego przy zastosowaniu metody MAE.

Z kolei, na duże uznanie zasługuje wdrożenie metody MAE na skalę przemysłową, co pozwoliło na średnie zwiększenie sprawności o $\Delta\eta = 0,4\%$ (na próbie ok. 1000 ogniw!), w stosunku do poziomu 15,8% dla ogniw nieteksturowanych (tab. 9.2, str. 130).

Wyniki zaprezentowane w rozdz. 8 i 9 pokazują, że metoda MAE pozwala na uzyskanie sprawności ogniw z krzemu taśmowego na średnim poziomie $\eta = 16,2\%$. Należy przy tym dodać, że już w 2003 roku dla ogniw z tego samego rodzaju krzemu otrzymano

$\eta = 17,8\%$ bez teksturyzacji, ale za to z podwójną warstwą antyrefleksyjną z MgF_2 i SiN_x [D.S. Kim *et al.*, Proc. 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka (Japan) 2003, p. 1293], co może świadczyć o tym, że ta metoda jest bardziej obiecująca niż metoda MAE.

Końcowa część rozprawy to podsumowanie, w którym Autor uwypuklił zasadnicze wyniki pracy związane z metodą MAE, przy czym podobnie jak w „Abstraktach”, Autor podaje o ile wzrosła sprawność ogniw słonecznych otrzymanych tą metodą ($\Delta\eta = 0,4\%$), natomiast nie informuje o bezwzględnej wartości średniej sprawności ($\eta = 16,2\%$), która nie jest rekordowa dla ogniw na bazie krzemu taśmowego.

Przedstawiona rozprawa przedstawia wyniki kilkuletniej działalności badawczej Autora w dziedzinie krzemowych ogniw słonecznych, w tym przede wszystkim w technologii ich wytwarzania metodą MAE oraz wyznaczania parametrów użytkowych ogniw, i świadczy o jego wysokich kompetencjach na tym polu. Rozprawa dotyczy technologii i właściwości krzemowych ogniw słonecznych i tym samym wnosi istotny wkład do dyscypliny „Inżynieria materiałowa” w dziedzinie nauk technicznych.

Na uznanie zasługuje również fakt owocnej współpracy Autora z wieloma osobami zarówno w kraju, jak i za granicą, wyrażonej w ‘Acknowledgements’ (str. 165-166).

Doceniając trud Autora w przygotowaniu rozprawy w języku angielskim (w której można znaleźć kilka błędów), chciałbym zwrócić uwagę (ostatnie zdanie na str. 166), że słowo ‘fiancé’ (z języka francuskiego, z akcentem nad e) oznacza narzeczonego, natomiast narzeczona to ‘fiancée’.

Dobrą jakość i oryginalność wyników badań mgr. inż. J. Cichoszewskiego przedstawionych w rozprawie potwierdza duża liczba prac jej Autora opublikowanych w czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych. Łącznie, mgr inż. Jakub Cichoszewski jest autorem i współautorem 15 prac, w tym 5 prac opublikowanych w czasopismach z tzw. „listy filadelfijskiej”, jednej pracy nie będącej na tej liście oraz 9 prac opublikowanych w materiałach z międzynarodowych konferencji naukowych.

Drobne mankamenty rozprawy (podkreślone w tekście recenzji) nie podważają mojej, jak najbardziej pozytywnej, oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Cichoszewskiego i dlatego wnoszę o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

