

## **Nowe luminescencyjne koncentratory energii przeznaczone do procesów hermetyzacji modułów fotowoltaicznych**

**Mgr inż. Piotr Sobik**

### **Streszczenie**

Praca doktorska pt. „Nowe luminescencyjne koncentratory energii przeznaczone do procesów hermetyzacji modułów fotowoltaicznych” zawiera wyniki badań Luminescencyjnych Koncentratorów Energii (LSC-ang. Luminescent Solar Concentrator) ze szczególnym uwzględnieniem ich aplikacyjnego charakteru. Jest to zgodne z wytycznymi programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego "Doktorat wdrożeniowy" (Dz. U. poz. 873). Zawarte w pracy badania, zgodnie z założeniami programu „Doktorat wdrożeniowy”, prowadzone były w dwóch ośrodkach. Badania dotyczące charakterystyki materiałów i parametrów wytworzonych modułów fotowoltaicznych zostały zrealizowane w Laboratorium Fotowoltaicznym Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie. Prace związane z modyfikacją materiałów i przygotowaniem modułów fotowoltaicznych prowadzono w laboratorium firmy Helioenergia sp. z o.o. Praca składa się z dwóch części oraz obszernych dodatków.

## 1.Część pierwsza

W tej części pracy przedstawiono najważniejsze informacje wprowadzające do tematyki luminescencyjnych koncentratorów energii. Znalazła się tu aktualna analiza rynku fotowoltaicznego. Omówiono najważniejsze parametry promieniowania słonecznego w odniesieniu do LSC. Przedstawiono zasadę działania LSC, scharakteryzowano najważniejsze luminofory (Perylene Red i Egyptian Blue) oraz opisano najważniejsze materiały i technologię wytwarzania modułów PV, w których można zastosować LSC.

## 2.Część druga

W tej części na samym początku sformułowano dwie tezy: 1. Modyfikacja matrycy Luminescencyjnego Koncentratora Energii poprzez dobór odpowiednich rozpuszczalników jest wystarczająca do zapewnienia fotostabilności czerwonego Perylenu bez użycia dodatkowych czynników stabilizujących, 2. Wzbogacenie powłoki na szkło Błękitem Egipskim zwiększa sprawność modułu fotowoltaicznego poprzez efekt luminescencji w podczerwieni, oraz przedstawiono metodologię badań. Podczas prac wykorzystywano takie techniki badawcze jak: SEM, mikroskopia optyczna, grawimetria, spektroskopia UV-VIS-NIR, pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw i modułów fotowoltaicznych, oraz pomiary fotoluminescencji i

elektroluminescencji. W tej części pracy znalazły się zarówno opisy wybranych metod badawczych jak i samych urządzeń wykorzystanych podczas badań. W tej części pracy zawarto także najważniejsze wyniki, wnioski oraz opisano opracowaną technologię wytwarzania LSC oraz gotowych modułów z LSC. Opracowanie technologii wytwarzania modułów z LSC obejmowało trzy niezależne strategie: badanie modułu z kompozytem szkło-PMMA (Polimetakrylan metylu) z luminoforem w PMMA(I), badania LSC wykonanego bezpośrednio w folii laminacyjnej (II) oraz badanie powłoki z luminoforem ceramicznym na szkłe (III). W pracy tej wykorzystywano dwa rodzaje luminoforów: organiczny luminofor na bazie perylen, u Lumogen F Red 305 zwany czerwonym perylenem oraz ceramiczny luminofor o składzie  $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$  zwany Błękitem Egipskim. W ramach pierwszej strategii skupiono się na wytworzeniu kompozytu szkło-PMMA oraz badaniu jego odporności mechanicznej na zmienne warunki temperaturowe przewidziane w warunkach pracy modułu. Druga strategia obejmowała wykonanie modułów w oparciu o modyfikowaną folię do laminacji. Folie EVA (polietylen-co-octan winylu) oraz PVB (poliwinylobutyral) modyfikowane były przy użyciu czerwonego perylenu i laminowane w układy w konfiguracji szkło-szkło. Krytyczną z użytkowego punktu widzenia cechą układów była ich fotostabilność. Weryfikowana została ona przy użyciu technik spektroskopowych w zakresie UV-VIS-NIR i następnie porównanie widm przed i po starzeniu światłem symulującym światło słoneczne. Wpływ otrzymanego w folii koncentratora badano poprzez wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych modułów wspomaganych LSC. Trzecia strategia obejmowała syntezę Błękitu Egipskiego oraz obserwację jego właściwości luminescencyjnych w obrazowaniu metodą fotoluminescencji w zakresie bliskiej podczerwieni. Morfologia uzyskanych proszków w zależności od stosowanych technik ich obróbki analizowana była za pomocą technik SEM oraz mikroskopii optycznej. Uzyskane proszki wykorzystywane były do wykonania powłok na szkłe a następnie modułów fotowoltaicznych, które umożliwiały weryfikację oddziaływania efektu

luminescencyjnego na pracę ogniwa słonecznego. Na koniec podsumowano pracę i zweryfikowano postawione tezy oraz pokazano jaki efekt wdrożeniowy przyniosły przeprowadzone badania oraz analiza uzyskanych wyników. Teza pierwsza została potwierdzona. Uzyskano fotostabilny układ modułu fotowoltaicznego, który został wykonany w typowym procesie wytwarzania modułów a jednocześnie nie było konieczne użycie dodatkowych stabilizatorów. W przypadku drugiej tezy jej słuszność nie została potwierdzona w zadawalającym stopniu. Przeprowadzone badania pokazały, że uzyskano wzrost sprawności modułów, w których wykorzystano dodatek Błękitu Egipskiego, jednak wartość tego wzrostu na poziomie do 2% jest niewielka. Biorąc jednocześnie pod uwagę niepewność pomiaru prądu zwarcowego modułu wynoszącą 1,57% należy ostrożnie podchodzić do uzyskanych wyników. Mając na względzie wymagania programu „Doktorat wdrożeniowy”, pokazano także jaki efekt wdrożeniowy przyniosły przeprowadzone badania oraz analiza uzyskanych wyników. Opisano kompletną technologię, która jest w chwili obecnej wdrażana w firmie Helioenergia oraz pokazano prototypowe moduły z LSC oraz ich możliwe zastosowanie w postaci szklarni wspomagających wzrost roślin.

### 3. Dodatki

W dodatkach zawarto wszystkie dodatkowe wyniki przeprowadzonych badań, które mogą być przydatne z punktu widzenia opracowanej technologii. Praca zawiera 129 pozycji literaturowych z których

większość to pozycje opublikowane po 2000 roku przy czym 29 z nich pochodzi z trzech ostatnich lat czyli z okresy kiedy prowadzone były badania.

## **Abstract**

A thesis entitled "New Luminescent Solar Concentrators for packaging processes in photovoltaic modules" carries the results of Luminescence Solar Concentrators with an emphasis on their application. It is consistent with the Ministry of Science and Higher Education "Implementation Doctorate" program (Dz. U. poz. 873).

The research in the thesis was conducted in two locations. The part considering material characteristics and parameters of photovoltaic modules was performed in specialized and Accredited Testing Laboratory in Kozy which is a part of the Alexander Krupkowski Institute of Metallurgy and Materials Science of the Polish Academy of Sciences in Krakow. The part considering the material modification and photovoltaic modules preparation was conducted in the laboratory of Helioenergia sp. z o.o. The thesis is divided into two parts and vast appendices.

## 1. Part one

This part contains the most important information necessary to introduce the LSC topic. It contains the most recent analysis of the photovoltaic market and the discussion of the most important parameters of solar radiation in respect to the LSC, but it also presents the LSC functioning principle, the characteristic of the most important luminophores (Perylene Red and Egyptian Blue) and the description of the most important materials and the technology of the LSC-suitable PV module production.

## 2. Part two

In the beginning of this part the two theses were presented:

(I) Modification of Luminescent Solar Concentrator's host matrix by appropriate selection of solvent with no additional stabilizer is sufficient to preserve photostability of Perylene Red dye,

(I) Enriching of glass coating with Egyptian Blue increases the

photovoltaic module efficiency by means of the infrared luminescent support effect,

Other than that the methodology of research is also presented in this part. During the research various techniques were implemented. The most important being SEM, optical microscopy, gravimetry, UV-VIS-NIR spectroscopy, solar cells and photovoltaic modules current-voltage characteristic measurements, and the measurements of photoluminescence and electroluminescence. In this part both the descriptions of chosen research methods as well as the measuring appliances were included. This part also presents the most important results and conclusions. The complete technology of LSC and modules with LSC preparation was presented. The development of the LSC modules preparation technology was divided into three independent strategies. The first one is the examination of the glass-PMMA (poly methyl methacrylate) with the luminophore in the PMMA. The second is the examination of the LSC prepared directly in the lamination foil and the third one is the examination of the ceramic luminophore on glass. Two kinds of luminophores were implemented in the thesis: organic luminophore based on perylene - Lumogen F Red 305, also known as perylene Red, and a ceramic luminophore with the  $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$  composition called Egyptian Blue.

The first strategy focused on preparation of glass-PMMA composite and examining its mechanical resilience to changing temperature predicted for future module work environment.

The second strategy focused on preparation of the modules based on

modified lamination foil. EVA foils (ethylene-vinyl acetate) and PVB foils (polyvinyl butyral) were modified by Perylene Red and laminated into glass-glass configuration systems. From the usability perspective, the most crucial characteristic of the systems was their photostability. It was verified by spectroscopic techniques in UV-VIS-NIR range and by comparing the spectra from before and after simulated solar light aging process. The influence of the concentrator in the foil was measured by determination of the current-voltage characteristic of the LSC supported modules.

The third strategy focused on the synthesis of Egyptian Blue and observation of its luminescence properties by means of near infrared photoluminescence imaging. The morphology of the procured powders, depending on their processing techniques, was analyzed by SEM and optical microscopy. The procured powders were used to apply create layers on the glass and then for photovoltaic modules, which made it possible to verify the influence of the luminescence effect on the functioning of the solar cell.

The last part presents not only the summary of the work, but it also provides the verification of the theses, and shows the implementation effect of the research as well as the analysis of the results

The first thesis was confirmed. A photostable system of photovoltaic module was prepared in a typical production process and no additional stabilizers were necessary.



The second thesis was not confirmed in a satisfactory degree. The research showed that the increase of the module efficiency was achieved only for the modules with the addition of Egyptian Blue, but the 2% increase it reached is insignificant. At the same time the uncertainty of the short-current measurement of the module reaching 1.57%, one must consider careful consideration of the results.

Because of the requirements of the "Implementation Doctorate" also the implementation effect of the conducted research and the analysis of the results had to be presented. The complete production technology as well as the prototype LSC modules created by Helioenergia company were presented in the thesis, as well as their possible applications for greenhouse structure supporting plant growth

### 3. Appendices

The appendices constitute the additional results of all the independently conducted research, which may be useful from the perspective of the developed technology.

The thesis' reference list contains 129 entries, most of which were published after year 2000 and 29 of which within the last three years - a

period in which this research was also conducted.

[Recenzja - Prof. M. Pociask-Biały](#)

[Recenzja - Prof. M. Sibiński](#)