

## Właściwości optyczne pokryć antyrefleksyjnych dla zastosowań fotowoltaicznych

**Streszczenie.** W pracy przeanalizowano wpływ pokryć antyrefleksyjnych zarówno na powierzchni szkła modułu fotowoltaicznego jak i stosowanych warstw ARC na powierzchni ogniw słonecznych na bazie krzemu na właściwości optyczne systemu. Wyznaczono rekomendowane wartości współczynników załamania oraz grubości pokryć. Wyliczone wartości pozostają w zgodności z wynikami pomiarów optycznych.

**Abstract.** In this paper authors analyzed the influence of antireflective coatings on glass surface of PV module and influence of ARC deposited on silicon surface of solar cells on optical properties of the system. The recommended values of thicknesses and refractive indices were estimated. These values are in a good agreement with results of optical measurements. **Optical properties of antireflective layers for photovoltaic applications**

**Słowa kluczowe:** ogniwa słoneczne, fotowoltaika (PV), właściwości optyczne, pokrycia antyrefleksyjne (AR).

**Keywords:** solar cells, photovoltaics (PV), optical properties antireflective coatings (ARC)

doi:10.12915/pe.2014.09.25

### Wprowadzenie

Istotnym problemem jest zmniejszenie współczynnika odbicia światła od powierzchni szkła w zewnętrznej części panelu PV. Powłoki antyrefleksyjne (AR) na szkłe znajdują zastosowania przy produkcji paneli złożonych z ogniw słonecznych. Cienkie, antyrefleksyjne warstwy obniżają odbicie światła, wykorzystując zjawisko interferencji fali oraz zależność współczynnika odbicia od współczynnika załamania światła.

Zmniejszenie współczynnika odbicia światła od powierzchni szkła w zewnętrznej części panelu PV możliwe jest przez stosowanie powłok antyrefleksyjnych. Kluczowe jest właściwe dobranie parametrów warstwy obniżającej odbicie, dzięki właściwemu współczynnikowi załamania światła. Na właściwości antyrefleksyjne wpływa grubość warstwy, współczynnik załamania, a przy nawet zgrubnej kontroli tych parametrów łatwo jest osiągnąć zmniejszenie odbicia o 4-5%. Metody optyczne pozwalają na weryfikację wyliczonych optymalnych grubości i współczynników załamania dla zadanego obszaru spektralnego. Promień świetlny ulega odbiciu od granicy ośrodek zewnętrzny (np. powietrze) – warstwa oraz ośrodek (szkło)–warstwa. Grubość warstwy antyrefleksyjnej wynika z poniższej relacji przy założeniu bardzo słabej absorpcji ( $k \approx 0$ )

$$nd = \frac{\lambda}{4}$$

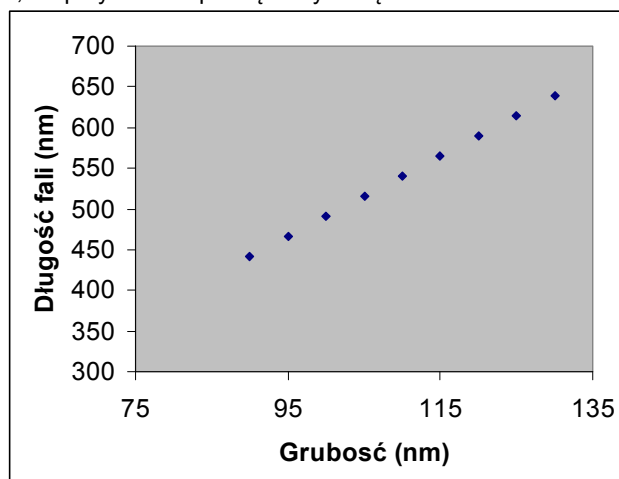
gdzie  $n$  jest rzeczywistą składową współczynnika załamania światła w warstwie,  $\lambda$  długością fali światła z obszaru maksymalnej fotoczułości ogniwa, a  $d$  grubością warstwy. Ponadto zachodzi związek:

$$n^2 = n_0 n_2$$

gdzie  $n_0$  to współczynnik załamania światła powietrza a  $n_2$  współczynnik załamania światła dla odpowiedniego rodzaju podłoża szklanego. W zależności od właściwości warstwy antyrefleksyjnej na podłożu szklanym uzyskuje się efekt zwiększenia transmisji światła w danym obszarze spektralnym. Najważniejsze parametry warstwy AR to jej współczynnik załamania i grubość. Te dwa parametry winny być dokładnie kontrolowane w procesie wytwarzania tafli o dobrych parametrach użytkowych. Biorąc pod uwagę warstwę AR o współczynniku załamania 1,23 położenie obszaru maksymalnej transmisji światła będzie zależało od grubości warstwy, co przedstawiono na rysunku 1.

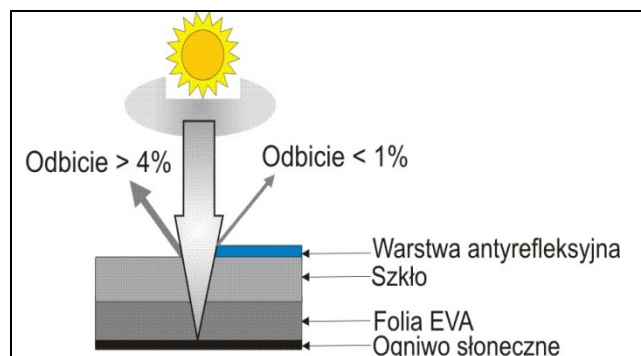
W ostatnich latach do produkcji warstw AR stosowane są metody sol-gel pozwalające uzyskać materiały o dobrych

parametrach użytkowych. Na AGH opracowano technologię wytwarzania cienkich warstw na szkłe metodą sol-gel [1]. Uzyskane warstwy SiO<sub>2</sub> miały współczynnik załamania  $n = 1,35$  dla długości fali 550 nm (dla szkła  $n = 1,52$ ). Dzięki zastosowaniu warstwy AR współczynnik odbicia zmalał do 2,5% przy odbiciu początkowym rzędu 8%.



Rys.1. Zależność położenia obszaru maksymalnej transmisji światła od grubości warstwy AR  $n = 1,23$

Na rysunku 2 przedstawiono strukturę modułu PV z zaznaczonym wpływem warstw AR dla zwiększenia fotogeneracji w ogniwie słonecznym. W strukturze uwzględniono komercyjnie stosowaną folię laminacyjną EVA.



Rys.2. Schemat przejścia promieni słonecznych przez strukturę ogniwa

## Charakterystyka optycznych właściwości powłok antyrefleksyjnych dla zastosowań fotowoltaicznych

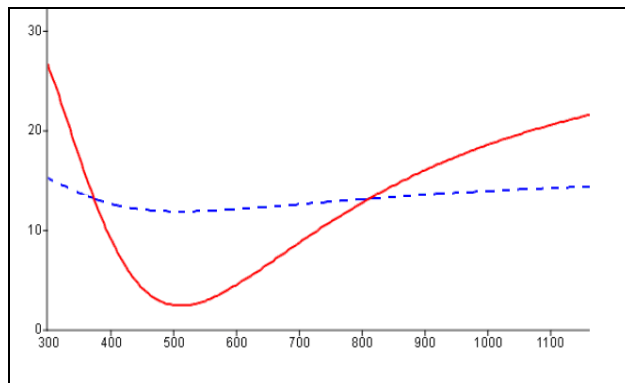
Biorąc pod uwagę dostępne rodzaje szkła o znanych właściwościach optycznych możliwe jest wyliczenie optymalnych grubości warstw AR oraz ich współczynników załamania, dla których uzyskuje się maksymalną transmisję światła [2]. W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń dla zadanej długości fali światła równej 600 nm. W nisko kosztowych technologiach PV istotne jest znaczne zmniejszenie kosztów materiałów i pracochłonności produkcji nawet przy rezygnacji z wysokich sprawności ogniw słonecznych, czego przykładem są ogniwa z krzemu multikrystalicznego (mc-Si). W końcowej cenie modułów PV ok. 40 – 50% stanowi materiał wejściowy. Rozpatrując wzrost sprawności ogniw produkcji muszą brać pod uwagę różnorodne czynniki np. stosowane powłoki antyodbiciowe (ARC – Anti Reflective Coating) czy też wzrastający z biegiem lat rozmiar stosowanych płytek krzemowych od 10×10 cm<sup>2</sup> poprzez 12,5×12,5 cm<sup>2</sup> nawet do rozmiaru 20×20 cm<sup>2</sup> przy grubościach ograniczonych do 150 μm.

Tabela 1. Wyniki obliczeń współczynnika załamania światła dla warstwy AR oraz optymalnej grubości warstwy AR dla długości fali światła 600 nm dla różnych rodzajów szkła

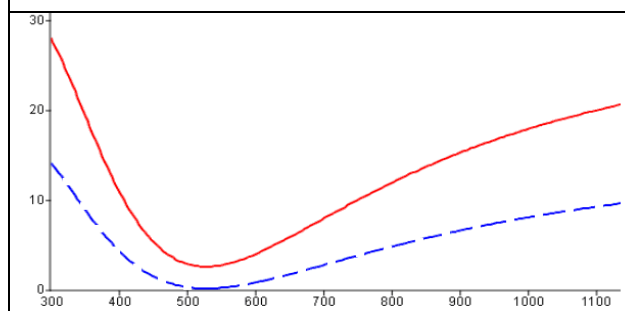
Rodzaj szkła	Wsp. załamania szkła	Wsp. załamania warstwy AR	Optymalna grubość warstwy AR [nm]
BK7	1,5168	1,232	119
BAK1	1,5725	1,254	117
BAF10	1,6700	1,292	114
FK51A	1,4865	1,219	120
Fused silica	1,4585	1,208	122
Fused germania	1,6085	1,268	116
LASK9	1,8502	1,360	108
B270 Superwite SCHOTT	1,525	1,235	119
Zero DUR	1,5424	1,242	118
CROWN	1,52	1,233	119
Flint Glass	1,62	1,273	115
PV Glass commercial	1,51	1,229	119

Drugi element mający wpływ na wartość odbicia światła w architekturze modułu to cechy warstwy antyrefleksyjnej na podłożu ogniwa słonecznego i rodzaj otaczającego ośrodka. Przeanalizowano spektralną zależność współczynnika odbicia światła od powierzchni ogniwa dla różnych wartości współczynnika załamania warstwy AR oraz grubości, biorąc pod uwagę rodzaj otaczającego ogniwo ośrodka. Na rysunku 3 przedstawiono spektralną zależność współczynnika odbicia w zależności od współczynnika załamania warstwy AR oraz jej grubości.

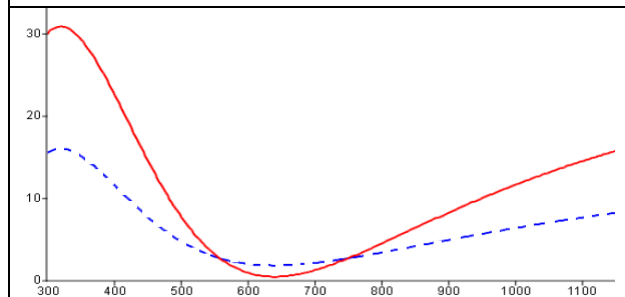
Z przeprowadzonych badań wynika, iż optymalna grubość warstwy antyrefleksyjnej na powierzchni krzemu monokrystalicznego wynosi ok. 80 nm, a współczynnik załamania około 2,0 [2]. Na rysunku 4 przedstawiono zmianę względnej wydajności konwersji fotowoltaicznej modułu od wartości współczynnika odbicia światła. Wyniki uzyskano przy użyciu oprogramowania PC1D (Special Research Centre, University of New South Wales, Sydney).



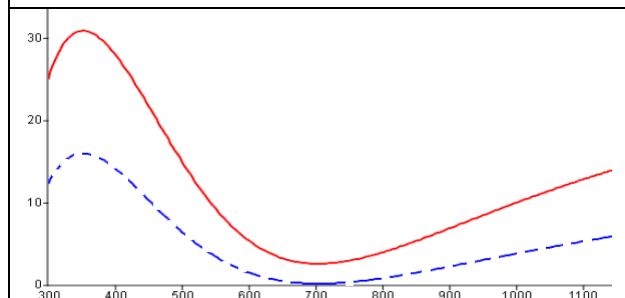
Spektralna zależność współczynnika odbicia światła (w %) od długości fali (w nm) od powierzchni ogniwa dla współczynnika załamania warstwy AR  $n = 1,6$  oraz grubości  $d = 80$  nm. Linia ciągła dla otaczającego powietrza, przerywana dla szkła.



Spektralna zależność współczynnika odbicia światła (w %) od długości fali (w nm) od powierzchni ogniwa dla współczynnika załamania warstwy AR  $n = 2,2$  oraz grubości  $d = 60$  nm. Linia ciągła dla otaczającego powietrza, przerywana dla szkła

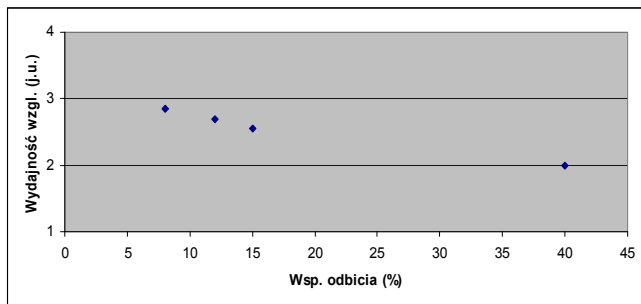


Spektralna zależność współczynnika odbicia światła (w %) od długości fali (w nm) od powierzchni ogniwa dla współczynnika załamania warstwy AR  $n = 2,0$  oraz grubości  $d = 80$  nm. Linia ciągła dla otaczającego powietrza, przerywana dla szkła



Spektralna zależność współczynnika odbicia światła (w %) od długości fali (w nm) od powierzchni ogniwa dla współczynnika załamania warstwy AR  $n = 2,2$  oraz grubości  $d = 80$  nm. Linia ciągła dla otaczającego powietrza, przerywana dla szkła

Rys.3. Spektralna zależność współczynnika odbicia w zależności od współczynnika załamania warstwy AR oraz jej grubości

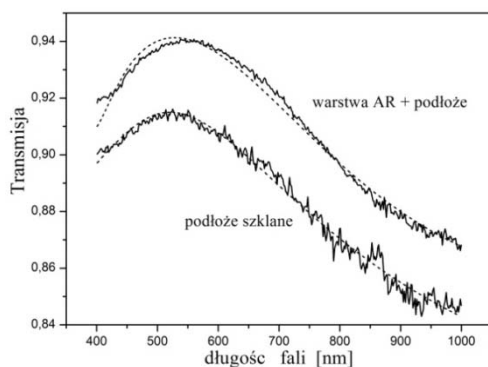


Rys.4. Spodziewana względna wydajność (sprawność) konwersji fotowoltaicznej modułu od wartości współczynnika odbicia światła

### Wyniki pomiarów optycznych

Do badań właściwości optycznych warstwy AR na podłożu szklanym zastosowano metodę elipsometrii spektroskopowej. Elipsometria jest nieniszcząca, bezkontaktową metodą wyznaczania parametrów optycznych (współczynniki załamania i ekstynkcji) oraz grubości warstw ciał stałych ciał stałych [5, 6]. W elipsometrii wykorzystuje się zjawisko zmiany polaryzacji światła liniowo spolaryzowanego na polaryzację eliptyczną po odbiciu od cienkiej warstwy. Parametry elipsy polaryzacji takie jak nachylenie osi elipsy do płaszczyzny padania oraz stosunek jej amplitud maleją do dużej półosi są bezpośrednio związane poprzez zależności współczynników odbicia i transmisji Fresnela z parametrami optycznymi i grubością warstwy badanej warstwy [7].

W badaniach optycznych warstwy AR wykorzystano elipsometr spektroskopowy M2000 firmy Woolam Co. Pomiar wykonano dla kątów padania  $60^\circ$ ,  $65^\circ$  i  $70^\circ$  w zakresie widmowym od 350 do 1000 nm, w którym założono brak absorpcji w warstwie i podłożu. Z dopasowania modelu optycznego do układu cienka warstwa - podłoże wyznaczono średnie wartości współczynnika załamania: podłoża szklanego  $n = 1,53$ , warstwy AR  $n = 1,31$ , natomiast grubość warstwy wynosiła 121 nm. Porównując te wartości z wartościami współczynników załamania warstw podanymi w tabeli 1 można wnioskować, że aby uzyskać optymalnie najniższe wartości współczynnika odbicia światła od warstwy AR jej efektywny współczynnik załamania powinien być mniejszy uzyskanego z danych eksperymentalnych.



Rys.5. Zależność widmowa współczynnika transmisji dla podłoża szklanego oraz warstwy AR (krzywa ciągła – dane eksperymentalne, krzywe przerywane – zależności teoretyczne dopasowane z modelu optycznego)

Stałe optyczne dla warstwy antyrefleksyjnej wyznaczone z pomiarów elipsometrycznych zastosowano do dopasowania wzorów teoretycznych do wyników z pomiarów transmisji. W celu sprawdzenia poprawności przyjętego modelu wykonano pomiar transmisji elipsometrem M2000 [8]. Na rysunku 5 przedstawiono widma transmisji optycznej krzywą teoretyczną transmisji z opisanego powyżej modelu dla podłoża szklanego oraz dla układu warstwa AR/podłoże. Jak wynika z rysunku 5 istnieje dobra zgodność pomiędzy wynikami uzyskanymi z obu metod, tj. z badań elipsometrycznych i pomiarów transmisji.

### Podsumowanie i wnioski

Wartości grubości oraz właściwości optyczne pokrycia AR szklanego podłoża struktury fotowoltaicznej najsilniej wpływają na współczynnik odbicia światła. Względna wydajność (sprawność) konwersji fotowoltaicznej zależy od wartości współczynnika odbicia światła. Dzięki zastosowaniu pokryć antyrefleksyjnych zarówno tafli szklanej jak i samej struktury ogniwa spodziewać się można względnego wzrostu wydajności rzędu 40%.

*Praca współfinansowana przez Unię Europejską ze Środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Działanie „Wsparcie projektów B+R na rzecz przedsiębiorców realizowanych przez jednostki naukowe” projekt POIG.01.03.01-30-056/12 pt. „Badania nad opracowaniem wytycznych, technik i technologii dla systemów kompensacji mocy biernej, inteligentnego monitoringu wewnętrznych sieci elektroenergetycznych oraz ogniw fotowoltaicznych dedykowanych obiektom hybrydowym opartym wyłącznie o źródła odnawialne”.*

### LITERATURA

- [1] Nocun M., Kwasny S., Skuba P., Otrzymywanie powłok antyrefleksyjnych na szkle techniką zol-żel *Materiały Ceramiczne /Ceramic Materials* 62 (2010) nr. 1, 46-50
- [2] Marszałek K, Winkowski P., Jaglarz J., Optical properties of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> antireflective coatings *Materials Science Poland*, 32 (2014) nr.1, 80-87
- [3] Swatowska B., Stapinski T., Drabczyk K., Panek P., The role of antireflective coatings in silicon solar cells – the influence on their electrical parameters, *Optica Applicata*, XLI, (2011) nr. 2, 487-492
- [4] Kaes M., Hahn G., Peter K., Enebak E., *Proc. 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-IEEE, Waikoloa, Hawaii, May 7–12, 2006*
- [5] Fujiwara H., *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*, J. Wiley & Sons (2007)
- [6] Azzam R.M.A., Bashara N.M., *Ellipsometry and polarized light*, North-Holland, Amsterdam 1987
- [7] Karasiński P., Jaglarz J., Reben M., Skoczek E., Mazur J., Porous silica xerogel films as antireflective coatings – Fabrication characterization, *Optical Materials* 33 (2011) 1989-1994
- [8] Jaglarz J., Wagner T., Cisowski J., Sanetra J., Ellipsometric studies of carbazole-containing polymer layers, *Optical Materials*, 29, (2007) 908-912

**Autorzy:** prof. dr hab. Tomasz Stapiński, AGH w Krakowie, Katedra Elektroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [stap@agh.edu.pl](mailto:stap@agh.edu.pl), dr inż. Konstanty Marszałek, AGH w Krakowie, Katedra Elektroniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [marszale@agh.edu.pl](mailto:marszale@agh.edu.pl), dr hab. Janusz Jaglarz, Politechnika Krakowska, Instytut Fizyki, ul. Podchorążych 1, 30-084 Kraków, [puiaglar@cyfronet.pl](mailto:puiaglar@cyfronet.pl).