

Metody realizacji pomiarów składowych natężenia promieniowania słonecznego dla monitoringu naukowego w różnych zakresach widmowych na potrzeby zastosowań fotowoltaicznych

MICHAŁ MODZELEWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki

W dobie rozwoju generatorów energii pozyskiwanej z nośników odnawialnych szczególnie istotne jest gromadzenie danych, dotyczących energii promieniowania słonecznego. Potencjalnego inwestora w sektorze generatorów słonecznej energii elektrycznej szczególnie interesują miarodajne dane pomiarowe, dokumentujące rzeczywiste zasoby środowiska w nośniki energii odnawialnej i rzeczywiste możliwości wykorzystania energii słonecznej na danym obszarze. Z faktu tego wynika konieczność usadawiania meteorologicznych systemów pomiarowych, gromadzących dane na temat kluczowych dla fotowoltaiki zasobów. Poprawnie zaprojektowany kompleksowy system pomiarowy zapewnia miarodajne porównanie energii wyprodukowanej przez system fotowoltaiczny z ilością energii promieniowania słonecznego. Należy zwrócić szczególną uwagę na fakt istnienia różnych wielkości radiometrycznych i konsekwencji tego faktu dla pomiarów meteorologicznych na potrzeby fotowoltaiki użytkowej. Istnieją trzy rodzaje wielkości radiometrycznych: energetyczne, fotometryczne (światłne) i fotonowe. Każdy z nich służy do określania innego rodzaju promieniowania. Innymi słowy obiera się zawsze taki rodzaj wielkości aby najbardziej miarodajnie opisać charakterystykę promieniowania padającego. Dla określenia miana wielkości radiometrycznych używa się w fotowoltaice zawsze wielkości energetycznych. W artykule tym przedstawiono praktyczne informacje pozwalające na zbieranie danych w taki sposób, aby można było je porównać z profesjonalnymi systemami akwizycji danych.

Rodzaje systemów monitorujących

Specjalistyczne pomiary natężenia składowych promieniowania słonecznego w różnych zakresach widmowych pod kątem potencjalnych zastosowań fotowoltaiki nie wchodzi w zakres badań stacji meteorologicznych IMiGW. Do danych zbieranych przez stacje meteorologiczne należą: prędkość i kierunek wiatru, temperatura otoczenia, ciśnienie atmosferyczne, opad atmosferyczny, zmętnienie i nieprzezroczystość powietrza. Żadne z tych parametrów nie opisuje wielkości odpowiedzialnych za generację ładunków elektrycznych w systemach fotowoltaicznych, a część z nich nie ma wpływu na te parametry. Koniecznym jest zatem zbudowanie układu monitorującego dedykowanego zastosowaniom fotowoltaicznym. Najbardziej kluczową kwestią przy projektowaniu każdego systemu monitorującego wielkości meteorologiczne na potrzeby fotowoltaiki jest sprecyzowanie celu, dla którego dana wielkość fizyczna będzie mierzona. Istotne jest, aby na etapie przygotowań do budowy systemu pomiarowego wiedzieć jakie informacje o systemie fotowoltaicznym chcemy pozyskać w przyszłości. Systemy pomiarowe zbierające informacje o rzeczywistych warunkach radiacyjnych Słońca muszą spełniać kilka podstawowych wymagań. Po pierwsze

czujniki muszą znajdować się w miejscach reprezentatywnych dla danego układu, a pomiary realizowane w płaszczyźnie modułów umożliwiają stwierdzenie, jaka jest rzeczywista, użyteczna energia niesiona przez strumień fotonów. Z drugiej strony jednak należy pamiętać, że tylko pomiary realizowane w płaszczyźnie horyzontalnej umożliwiają porównanie znormalizowane z innymi fotowoltaicznymi stacjami meteorologicznymi na świecie. Meteorologiczny system pomiarowy dla fotowoltaiki nie może wpływać na mierzone parametry ani na monitorowany system fotowoltaiczny. W szczególności należy wyeliminować wszystkie czynniki mogące sprzęgać w jakikolwiek sposób układ pomiarowy z monitorowanym. Z założenia każdy system monitorujący musi być całkowicie niezależny od systemu monitorowanego a pobór mocy nie powinien przekraczać kilku procent mocy generowanej przez system fotowoltaiczny. Jakikolwiek wpływ jednego systemu na drugi powoduje wzrost wzajemnej susceptancji układowej i w efekcie zniekształcenie pomiarów.

Monitorowanie systemów fotowoltaicznych można prowadzić w trzech trybach:

- 1) Globalnym (*ang. global monitoring*),
- 2) Analitycznym (*ang. analytical monitoring*),
- 3) Naukowym (*ang. professional monitoring*).

TRYB GLOBALNY

Najprostszą metodą monitorowania małych systemów fotowoltaicznych zarówno tych podłączonych do sieci, jak i wolnostojących jest monitorowanie w trybie globalnym. Najczęściej mierzonymi parametrami są natężenie promieniowania globalnego, energia wyprodukowana przez moduły PV i energia oddana do sieci (w przypadku systemów podłączonych do sieci), spadki napięć i wartości prądów akumulatorów (w systemach wolnostojących). Do pomiaru tych parametrów wystarczą proste liczniki energii, kontrolery ładowania akumulatorów oraz niezależne od rodzaju monitorowanego systemu ogniwa wzorcowe kompatybilne materiałowo z materiałem, z którego wykonany jest moduł fotowoltaiczny. Odczyt i akwizycja danych najczęściej odbywa się przy użyciu prostych rejestratorów.

TRYB ANALITYCZNY

Bardziej zaawansowaną metodą analizy pracy systemów fotowoltaicznych w rzeczywistych warunkach środowiskowych jest monitoring analityczny. Systemy pomiarowe tego rodzaju monitoringu są dużo bardziej skomplikowane niż te pracujące w trybie uproszczonym. Oprócz pomiaru wartości prądów, napięć i mocy, mierzone są parametry meteorologiczne, takie jak: temperatura powietrza i modułów, natężenie promieniowania słonecznego, prędkość wiatru. Z uwagi na dużą ilość zbieranych danych w takich systemach, stosuje się w nich automatyczne urządzenia rejestrujące i archiwizujące zebrane wyniki.

TRYB NAUKOWY

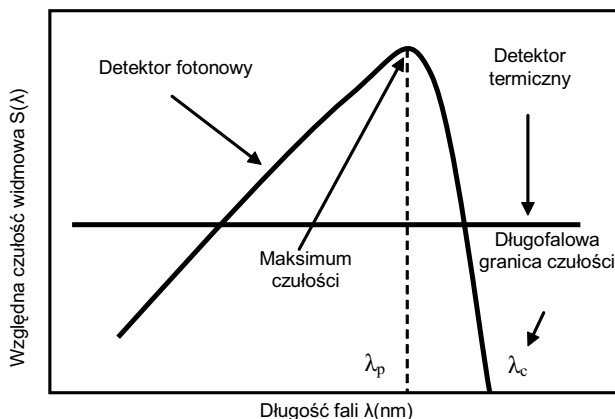
Monitoring naukowy jest najbardziej precyzyjną metodą pomiarów specjalistycznych wielkości radiometrycznych. Wykorzystywane urządzenia pomiarowe zależą w całości od charakteru prowadzonych badań. Analizy przeprowadza się w krótszym okresie niż w przypadku monitoringu analitycznego z ukierunkowaniem na pojedyncze parametry.

Normalizacja w radiometrii dedykowana systemom fotowoltaicznym umożliwia porównywanie danych pomiarowych uzyskanych w ośrodkach na całym świecie. Nie ma bowiem możliwości dokonania miarodajnych porównań wielkości radiometrycznych zebranych przez różne ośrodki jeżeli nie zostały one względem siebie zunifikowane. Obecnie produkowane i dostępne w handlu specjalistyczne radiometry dla zastosowań fotowoltaicznych są wzorcowane w akredytowanych ośrodkach certyfikacyjnych.

Rodzaje detektorów promieniowania dla zastosowań fotowoltaicznych

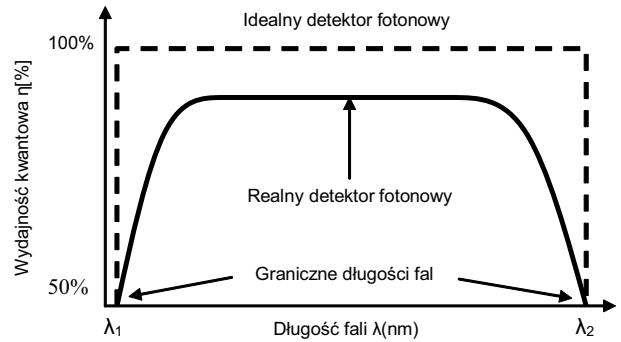
Istnieją dwa rodzaje detektorów promieniowania słonecznego dla zastosowań fotowoltaicznych: termiczne i fotonowe.

Detektory termiczne dla zastosowań monitoringu fotowoltaicznego służą do detekcji bezpośredniej promieniowania o długościach fal większych niż najmniejsze długości fal promieniowania ultrafioletowego. Padające na poczerniony detektor termiczny promieniowanie jest przezeń absorbowane, co wywołuje proporcjonalną zmianę danej właściwości materiału zależnej od temperatury. Do celów detekcji promieniowania słonecznego interesującego z punktu widzenia monitoringu systemów fotowoltaicznych stosuje się termopary cienkowarstwowe, charakteryzujące się czułością napięciową rzędu 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$. Ogólną cechą charakterystyczną detektorów termicznych i ich zaletą jednocześnie jest niezależność ich czułości widmowej oraz absorpcyjności od długości fali (rys. 1). Wielkość sygnału wyjściowego detektora termicznego nie zależy od składu widmowego padającego promieniowania co pozwala na stosowanie ich jako układów detekcji znormalizowanej w bardzo szerokim zakresie długości fal padającego promieniowania. Detektory termiczne o długofalowej granicy czułości powyżej 3000 nm muszą być jednak chłodzone do temperatur referencyjnych w celu wyeliminowania składowej termicznej prądu, która interferowałaby z prądem generowanym. Generalnymi wadami detektorów termicznych jest mała względem detektorów fotonowych szybkość odpowiedzi, znacznie mniejsza czułość w szerokim zakresie długości fal i znaczna masa oraz wyższa cena.



Rys. 1. Względne czułości widmowe detektorów termicznych (termopil) oraz fotonowych (ogniwi referencyjnych) (opracowano na podstawie [4])

Fig. 1. Arbitrary spectral sensitivities of thermal and photonic (reference cells) detectors (based on [4])



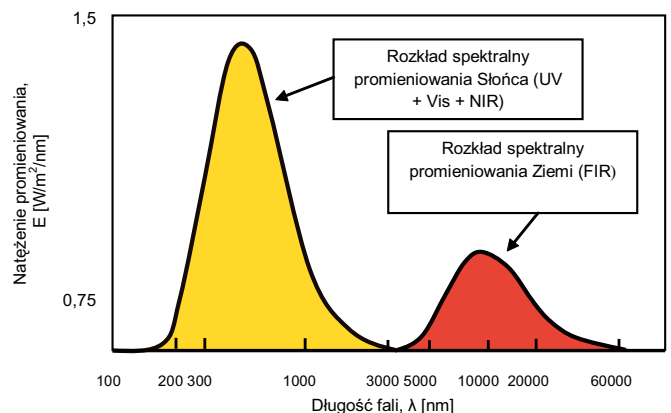
Rys. 2. Wydajność kwantowa detektorów fotonowych: realnego i idealnego w funkcji długości fali (opracowano na podstawie [1])
Fig. 2. Quantum efficiency of ideal and real photonic detectors versus wavelengths (Based on [1])

Detektory fotonowe działają na zasadzie skutków fizycznych oddziaływania fotonów promieniowania z siecią krystaliczną materiału absorpcyjnego. Wykazują one maksimum czułości dla danej długości fali, czyli selektywną zależność czułości spektralnej od długości fali. W porównaniu z detektorami termicznymi charakteryzują się one znacznie większymi czułościami i szybszą odpowiedzią na wzbudzenie promieniowaniem. Idealny detektor fotonowy powinien charakteryzować się generacją jednej pary nośników elektron-dziura w wyniku absorpcji jednego fotonu (rys. 2).

Równania bilansu promieniowania krótko i długofalowego

Promieniowanie krótkofalowe docierające do powierzchni Ziemi to promieniowanie pochodzenia słonecznego zawierające się w granicach długości fal od charakterystycznych dla ultrafioletu (UV – 100 nm) do charakterystycznych dla czerwonego promieniowania widzialnego (Vis) o długości fali co najwyżej 700 nm. Promieniowanie długofalowe docierające do powierzchni Ziemi to promieniowanie cieplne emitowane przez Słońce (tzw. bliska podczerwień – NIR). Powierzchnia Ziemi emituje z kolei promieniowanie długofalowe z zakresu dalekiej podczerwieni (FIR) – rys. 3.

Wiele ośrodków naukowych na świecie bada precyzyjnie bilans energetyczny systemów fotowoltaicznych. Efekty termiczne w systemach fotowoltaicznych powodują pogarszanie parametrów użytkowych i stanowią istotny problem w eksplo-



Rys. 3. Rozkład spektralny krótkofalowego promieniowania Słońca i długofalowego promieniowania powierzchni Ziemi
Fig. 3. Spectral distribution of shortwave solar radiation and longwave radiation of surface of the Earth

atacji tych systemów. Ogniwa i moduły fotowoltaiczne absorbują promieniowanie w zakresie krótkofalowym i emitują je w zakresie bliskiej podczerwieni. Powoduje to, że moduł fotowoltaiczny wyeksponowany na promieniowanie słoneczne nie jest w równowadze termodynamicznej z otoczeniem. W celu przeprowadzenia analizy wpływów poszczególnych zakresów promieniowania absorbowanego i emitowanego należy zastosować monitoring naukowy systemu fotowoltaicznego.

Zgodnie z konwencją Światowej Organizacji Meteorologicznej równanie globalne promieniowania krótkofalowego ma postać [2]:

$$G = S \cdot \cos(\alpha) + H$$

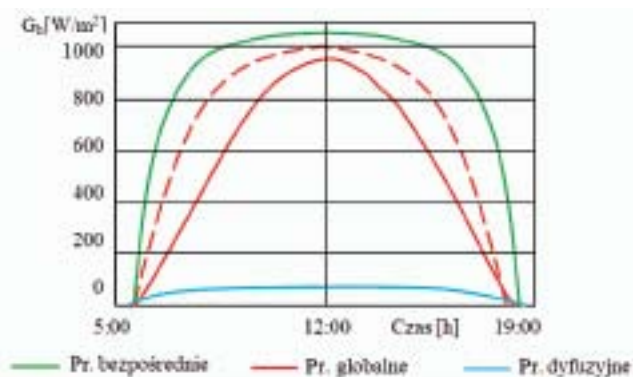
gdzie: G (*ang. Global Solar Radiation*) – natężenie globalnego promieniowania słonecznego, padającego na powierzchnię horyzontalną i mierzone bezpośrednio za pomocą pyranometrów lub ogniów wzorcowych o kącie widzenia 180° (zakres: 400...1100 nm); S (*ang. Direct Solar Radiation*) – natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego mierzone za pomocą pyrheliometrów śledzących położenie Słońca (tzw. sun tracking) o znormalizowanym kącie widzenia 5° (zakres: 280...3000 nm). Na charakterystyce równania globalnego, wartości natężenia promieniowania bezpośredniego są większe niż wartości natężenia promieniowania globalnego gdyż zakres pomiarowy pyrheliometrów jest większy niż zakres pomiarowy ogniów wzorcowych z krzemu krystalicznego; α – kąt padania promieniowania bezpośredniego względem normalnej do powierzchni; H (*ang. Diffuse Sky Radiation*) – natężenie krótkofalowego rozproszonego promieniowania atmosfery czyli takiego, które nie generuje cienia. Mierzone za pomocą pyranometrów z kulą lub pierścieniem zacieniającym detektor wraz z systemem śledzenia Słońca. Interpretacja fizyczna takiego promieniowania jest następująca: promieniowanie rozproszone symulowane w słoneczny dzień za pomocą kuli bądź pierścienia jest równoważne natężeniu promieniowania rozproszonego w pochmurny dzień.

Charakterystykę empiryczną równania globalnego przedstawia rys. 4.

Równanie bilansu promieniowania krótkofalowego B_{SR} ma postać [3]:

$$B_{SR} = S + H - R$$

gdzie: R (*ang. Reflected Global Radiation*) – odbite promieniowanie globalne z zakresu krótkofalowego.



Rys. 4. Wykres zależności natężenia promieniowania globalnego, bezpośredniego i dyfuzyjnego w ciągu bezchmurnego dnia. Linia przerywaną zaznaczono dodatkowo charakterystykę promieniowania globalnego, wyznaczoną pyranometrem z systemem śledzącym Słońce [2]

Fig. 4. Plot depicting dependencies between global, direct and diffuse solar radiation during cloudless day. Dotted line characterizes global radiation measured by pyranometer with sun tracker [2]

Promieniowanie długofalowe, to promieniowanie z zakresu dalekiej podczerwieni. Ono również podlega prawom sumowania. Totalne natężenie promieniowania T_d emitowane przez hemisferę opisuje suma:

$$T_d = S + H + A,$$

gdzie: A – odśłoneczne, długofalowe promieniowanie ciepłe atmosfery.

Totalne natężenie promieniowania, emitowane przez powierzchnię Ziemi T_u opisuje suma:

$$T_u = R + E,$$

R (*ang. Reflected Global Radiation*) – odbite promieniowanie globalne z zakresu krótkofalowego; E (*ang. Ground Surface Radiation*) – natężenie promieniowania podłoża.

Całkowity bilans promieniowania Q opisywany jest wzorem:

$$Q = S + H - R + A - E.$$

Pomiar natężenia promieniowania bilansowego będącego sumą kierunkową promieniowania z bardzo szerokiego zakresu długości fali nie ma dla zastosowań fotowoltaicznych większego znaczenia, gdyż aż 99,998% energii niesionej przez ten zakres promieniowania nie jest absorbowanych przez żaden materiał fotowoltaiczny, a promieniowanie ultrafioletowe w ogóle nie jest bilansowane. Ponadto długości fal promieniowania podczerwonego, emitowanego przez powierzchnie modułów zawierają się w zakresie bliskiej podczerwieni i efekty termiczne tej emisji są badane przez konwencjonalne czujniki temperatury.

Radiometry pomiarowe dla trybu naukowego

Pomiar natężenia promieniowania globalnego i odbitego – pyranometry i albedometry

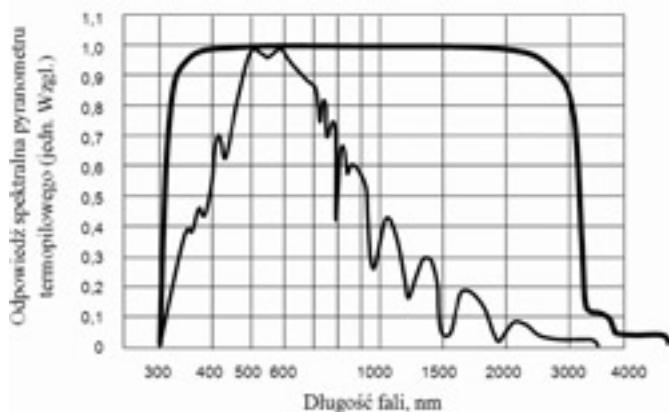
Promieniowanie globalne jest najbardziej istotną wielkością systemu monitorującego. Pomiarów promieniowania globalnego dokonuje się za pomocą pyranometrów. Zakres spektralny detektorów stosowanych w pyranometrach w większości przypadków zawiera się w granicach 300...3000 nm. Detektory w pyranometrach termicznych zbudowane są z termopar cienkowarstwowych z napylną warstwą symulującą ciało doskonale czarne celem sensybilizowania detektora na absorpcję promieniowania. Pyranometry usadowione w pozycji horyzontalnej umożliwiają porównywanie napromieniowania w różnych lokalizacjach zaś te usadowione w pozycji płaszczyzny modułu umożliwiają wyznaczanie rzeczywistego napromieniowania i teoretycznie dostępnej energii użytecznej. Pyranometrem realizuje się również pomiary promieniowania odbitego od powierzchni. Pyranometr taki jest ustawiany ku badanej powierzchni i osłonięty, tak aby promieniowanie bezpośrednie nie padało na detektor (rys. 5).

Charakterystyka odpowiedzi spektralnej detektora, zbudowanego z termopary cienkowarstwowej w funkcji długości fali promieniowania jest w katalogach podawana w jednostkach względnych. Nie oddają one rzeczywistej skali odpowiedzi na promieniowanie o danych długościach fali lecz informują jedynie dla jakich długości fali odpowiedź spektralna jest największa (rys. 6).



Rys. 5. Widok ogólny znormalizowanego pyranometru termopileowego (źródło: Campbell Corp)

Fig. 5. General layout of thermopile pyranometer (source: Campbell Corp)



Rys. 6. Unormowane do jedności wartości odpowiedzi spektralnej detektora pyranometru termicznego na tle charakterystyki spektralnej promieniowania słonecznego

Fig. 6. Arbitrary thermopile pyranometer's detector spectral response on the background of solar spectrum plot

Pomiar natężenia promieniowania bezpośredniego – pyrhelemetry

Pomiar promieniowania bezpośredniego jest wykonywany za pomocą pyrhelemetry. Zakres spektralnej odpowiedzi detektorów termopilowych stosowanych w pyrhelemetrych jest szerszy niż w pyranometrych i zawiera się w granicach 200...4000 nm. Różnica pomiędzy pyranometrem pyrhelemetrym tkwi w wąskim kącie widzenia równym 5° (rys. 7). Pyrhelemetry musi być ponadto zainstalowany w połączeniu z systemem śledzącym Słońce w płaszczyźnie horyzontalnej jak i azymutalnej.



Rys. 7. Widok ogólny pyrhelemetry (źródło: Campbell Corp)

Fig. 7. General layout of pyrhelemetry (source: Campbell Corp)

Pomiar natężenia słonecznego promieniowania rozproszonego – pyranometry z pierścieniem lub kulą zacięniającą

Pomiarów promieniowania rozproszonego dokonuje się za pomocą pyranometrów z kulą lub pierścieniem zacięniającą powierzchnię absorbera. Technicznie pomiary te realizuje się podobnie do pomiarów promieniowania bezpośredniego, gdyż niezbędnym do tego celu urządzeniem jest układ śledzący Słońce (rys. 8). W widmie promieniowania rozproszonego dominuje kolor niebieski ze względu na niedobór promieniowania czerwonego.



Rys. 8. Znormalizowana konstrukcja układu do śledzenia Słońca z pyranometrami zacięnionymi przez kule. Po prawej stronie widoczny jest przytwierdzony pyrhelemetry (źródło: Campbell Corp)

Fig. 8. General layout of device for tracking the sun with pyranometers located on and pyrhelemetry located in the right (source: Campbell Corp)

Pomiar promieniowania atmosferycznego i długofalowego promieniowania Ziemi – pyranometry i pyrgeometry

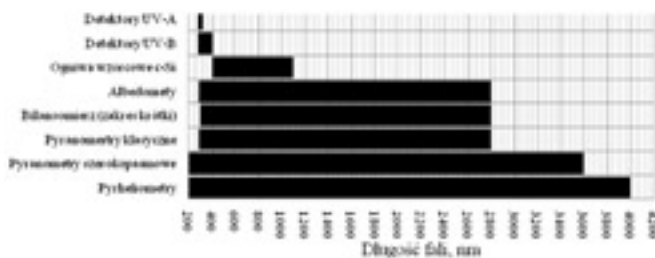
Promieniowanie atmosferyczne jest sumą promieniowania globalnego i podczerwonego atmosfery. Obejmuje swym zakresem długości fal 300...42000 nm. Pomiary promieniowania atmosferycznego są realizowane poprzez pyranometry i pyrgeometry (rys. 9). Pyrgeometry jest detektorem promieniowania długofalowego z zakresu 4500...42000 nm. Jego detektorem jest czuła termopara cienkowarstwowa z filtrem krzemowym uniemożliwiającą transmisję promieniowania krótkofalowego do detektora. Pomiar promieniowania Ziemi realizuje się poprzez zwrócenie detektora radiometrów w kierunku powierzchni Ziemi.



Rys. 9. Pyrgeometry służący do pomiaru natężenia promieniowania długofalowego (źródło: Campbell Corp)

Fig. 9. Pyrgeometer for long wave radiation measurement (Source: Campbell Corp)

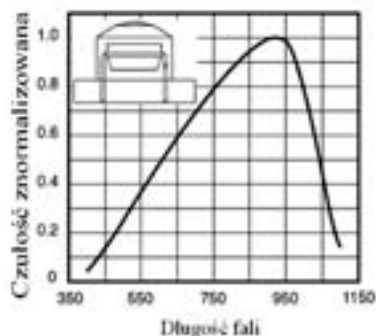
Nazwa detektora (klasa)	Zakres spektralny [nm]	Typ	Czułość [$\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ (max)]	Max natężenie [W/m^2]	Czas odpowiedzi [s]	Pole widzenia
Pyranometr (II)	300–2800	T	4–10 (Vis)	4000	< 8	180°
Pyranometr (II)	285–2800	T	7–14 (Vis)	4000	< 5	180
Pyranometr (I)	200–3600	T	7–14 (Vis)	4000	5	180
Pyranometr (III)	300–2800	T	5–20 (Vis)	2000	18	180
Ogniwo wzorcowe c-Si	400–1100	F	60–100 (Vis)	2000	< 1	180
Pyrgeometr (II)	4500–42000	T	5–15 (IR)	250	< 18	150
Pyrgeometr (III)	4500–42000	T	5–15 (IR)	250	18	180
Pyrheliometr	200–4000	T	7–14 (VIS)	4000	< 5	5
Detektor UVA	315–400	F	1 (UV)	90	0,5	180
Detektor UVB	280–315	F	1 (UV)	6	0,5	180
Bilansomierz selektywny	300–2800 4500–42000	T	10–20		< 10	180
Bilansomierz całkowity	200–200000	T	10		< 20	180



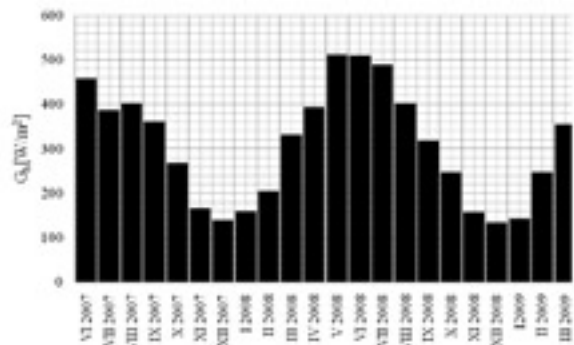
Rys. 10. Zestawienie zakresów detekcji bezpośredniej detektorów promieniowania krótkofalowego
Fig. 10. Depiction of ranges of radiation measured by different radiometers

Badania własne – analiza monitorowania w trybie globalnym

W okresie od czerwca 2007 do marca 2009 roku prowadzono monitoring w trybie globalnym znormalizowanego globalnego natężenia promieniowania słonecznego G_h o wartościach większych od $120 \text{ W}/\text{m}^2$ w płaszczyźnie horyzontalnej. Dane zebrano ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej na Wydziale Chemicznym Politechniki Gdańskiej za pomocą ogniwa referencyjnego wykonanego z fotodiody PIN BPW34, zlokalizowanego w płaszczyźnie horyzontalnej (rys. 11).



Rys. 11. Znormalizowana czułość fotodiody PIN użytej jako detektor promieniowania globalnego
Fig. 11. Normalised spectral response of photodiode used as detector for global radiation measurement

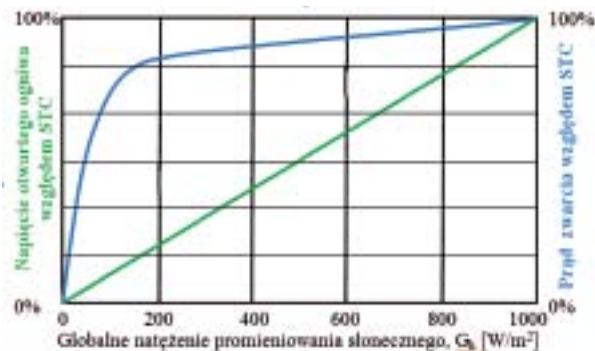


Rys. 12. Średnie miesięczne wartości znormalizowanego globalnego natężenia promieniowania w płaszczyźnie horyzontalnej G_h [W/m^2]
Fig. 12. Mean monthly horizontal global solar radiation – horizontal surface

Interwał czasowy, czyli czas między dwoma kolejnymi zarejestrowanymi danymi wynosił 5 s. Zebrane znormalizowane wg [1], dane globalnego natężenia promieniowania słonecznego przedstawiono na rys. 12.

W obliczeniach nie uwzględniono globalnego natężenia promieniowania o wartościach poniżej $120 \text{ W}/\text{m}^2$. Za przyjęciem takiego ograniczenia przemawia fakt ekspotencjalnego spadku generowanych przez moduł fotowoltaiczny z krzemu krystalicznego fotoprądów od wartości 75% prądu zwarcia w warunkach STC do zera w przedziale wartości globalnego natężenia promieniowania słonecznego o wartościach do $120 \text{ W}/\text{m}^2$ (rys. 13). Na gruncie fizycznego ograniczenia to wynika z faktu, iż promieniowanie globalne o natężeniu poniżej $120 \text{ W}/\text{m}^2$ to całkowicie promieniowanie dyfuzyjne. Ponieważ wartość maksymalnej czułości spektralnej krzemu krystalicznego przypada na długość fali $\lambda_{\text{max,c-Si}} = 950 \text{ nm}$, zatem w zakresie wartości $G_h < 120 \text{ W}/\text{m}^2$ generacja nośników ładunku elektrycznego w materiale z krzemu krystalicznego praktycznie nie zachodzi.

Napromieniowaniem na płaszczyznę horyzontalną, nazywamy całą z wartości globalnego natężenia promieniowania G_h w płaszczyźnie horyzontalnej, po czasie zwanym liczbą godzin słonecznych i wyrażanym w godzinach. Matematycznie wartość napromieniowania jest wielkością pochodną globalnego natężenia promieniowania słonecznego. Aby wyznaczyć wartość napromieniowania na płaszczyznę horyzontalną I_r



Rys. 13. Zależności prądu zwarcia i napięcia otwartego obwodu modułu fotowoltaicznego w funkcji globalnego natężenia promieniowania słonecznego
Fig. 13. Dependence of open circuit voltage and short circuit current versus global solar radiation

umożliwiającego porównywanie lokalizacji pod względem potencjału energetycznego systemów fotowoltaicznych z krzemu krystalicznego stosuje się wzór:

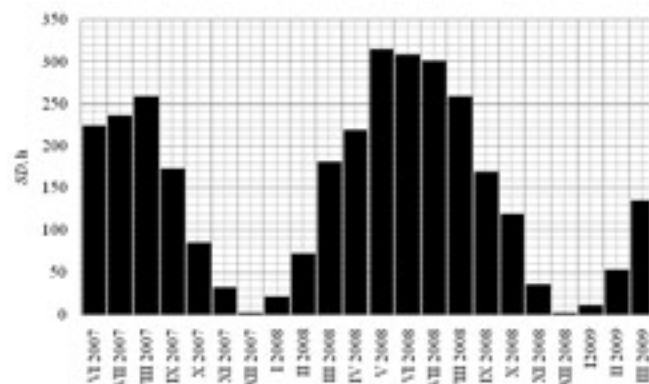
$$I_{r_h} = \int_{t_0}^{t_n} G_h dt \cong \frac{\sum_i^n G_h}{n} \cdot (t_n - t_0) = \overline{G_h} \cdot \Delta t$$

gdzie: G_h [W/m^2] – natężenie promieniowania globalnego; dt , Δt [h] – liczba godzin słonecznych w miesiącu; t_n [h] – całkowita ilość godzin w miesiącu; t_0 [h] – suma interwałów czasowych równa ilości godzin w miesiącu w których globalne; natężenie promieniowania słonecznego było mniejsze od $120 W/m^2$; n – ilość pomiarów w miesiącu.

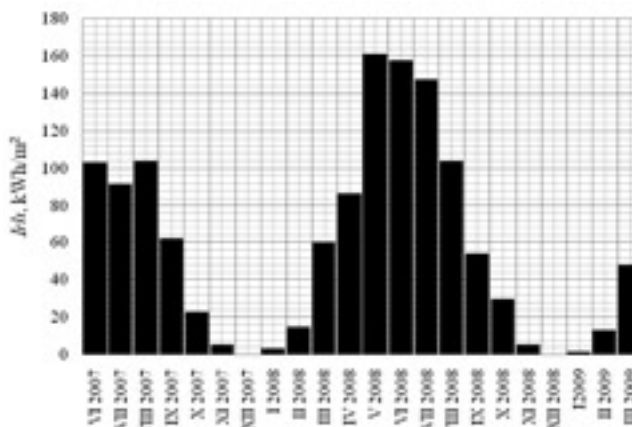
Aby obliczyć wartość napromieniowania na płaszczyznę horyzontalną należy znać liczby godzin słonecznych (*ang. Sunshine Duration*) w poszczególnych miesiącach. Liczba godzin słonecznych to okres czasu liczony w godzinach w którym wartość globalnego natężenia promieniowania jest większa od $G_h > 120 W/m^2$. Na rys. 14 przedstawiono całkowitą liczbę godzin słonecznych na podstawie danych zebranych przez ogniwo wzorcowe:

Automatyczne pomiary liczby godzin słonecznych można wyznaczać za pomocą elektronicznego przyrządu zwane go sumatorem godzin słonecznych (*ang. Sunshine Duration Sensor*). Detektorem sumatora jest fotodioda o zakresie spektralnym pokrywającym się z zakresem spektralnym ogniwa wzorcowego zastosowanego do niniejszych pomiarów.

Uzyskano następujące wyniki obliczeń napromieniowania w płaszczyźnie horyzontalnej (rys. 15):



Rys. 14. Liczba godzin słonecznych wyznaczona na podstawie pomiarów globalnego promieniowania słonecznego
Fig. 14. Number of sunshine hours per months obtained from global solar radiation

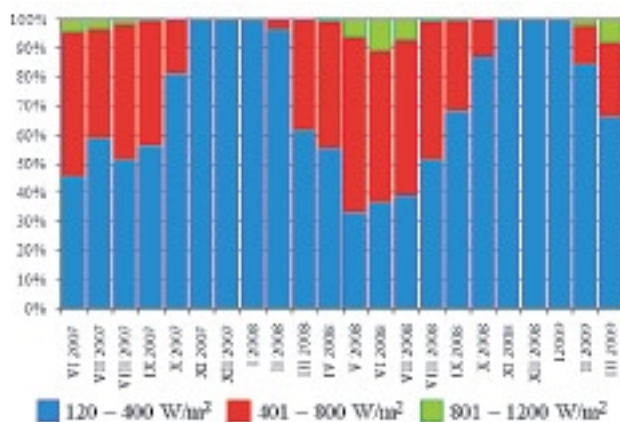


Rys. 15. Globalne napromieniowanie w płaszczyźnie horyzontalnej
Fig. 15. Global horizontal irradiance

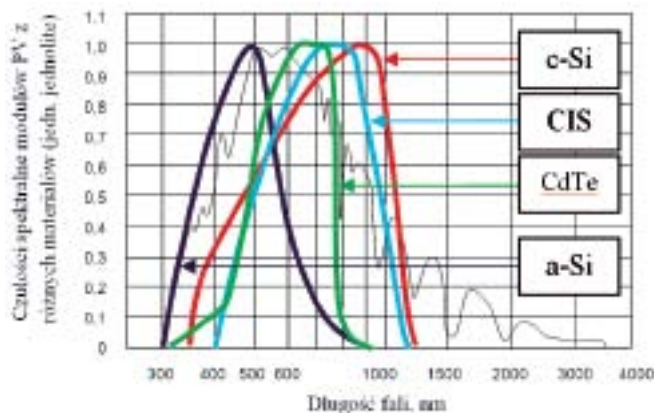
Pomiary meteorologicznych wielkości pochodnych są kluczowe ze względów normalizacyjnych zaś napromieniowanie w płaszczyźnie horyzontalnej będące pochodną globalnego natężenia promieniowania w płaszczyźnie horyzontalnej umożliwia zunifikowane porównywanie zasobów energetycznych Słońca w różnych lokalizacjach. Należy zaznaczyć, że meteorologiczna wartość napromieniowania w płaszczyźnie modułów, charakteryzuje ilość energii wyrażonej w kWh/m^2 , która zostałaby wygenerowana przez moduł fotowoltaiczny z krzemu krystalicznego o sprawności 100%.

Na podstawie zgromadzonych danych stworzono histogramy udziału poszczególnych zakresów wartości globalnego natężenia promieniowania słonecznego.

Okazuje się, że monitoring naukowy jest w niewielkim stopniu przydatny do pomiaru parametrów na potrzeby fotowoltaiki. Biorąc pod uwagę fakt, że radiometry referencyjne oddają całkowicie rzeczywiste zasoby promieniowania należy jedynie stosując monitoring globalny zwracać uwagę na rodzaj użytego wzorca względem zastosowanej technologii modułów fotowoltaicznych. Jak pokazano na rys. 17 czułość spektralna ogniwa wzorcowego użytego do detekcji promieniowania pokrywa się z czułością spektralną krzemowych krystalicznych ogniwa fotowoltaicznych i na podstawie danych zebranych z tego ogniwa wzorcowego możemy szacować potencjalny uzysk energetyczny tylko dla ogniw z krzemu krystalicznego. Planując budowę fotowoltaicznego systemu zbudowanego z innego materiału należy dokonać instalacji ogniwa wzorcowego o maksimum odpowiedzi spektralnej występującego dla tej samej długości fali co dla materiałów ogniwa fotowoltaicznych (rys. 17).



Rys. 16. Udział poszczególnych zakresów wartości globalnego promieniowania słonecznego
Fig. 16. Contribution of different ranges of global solar radiation



Rys. 17. Charakterystyki czułości spektralnej czterech popularnych materiałów wykorzystywanych do produkcji ogniw fotowoltaicznych na tle charakterystyki widmowej promieniowania słonecznego

Fig. 17. Spectral characteristics of four most common material used for photovoltaic modules on the background of solar spectrum

Wnioski

Przeprowadzona analiza radiometrów stosowanych do detekcji promieniowania w szerokim zakresie spektralnym w naukowym trybie monitorowania wykazała, że absolutna większość parametrów tego trybu nie opisuje parametrów pracy systemów fotowoltaicznych. Przeprowadzono badania własne i stwierdzono, że monitoring globalny jest wystarczającym narzędziem do szacowania zasobów energii słonecznej.

Literatura

- [1] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization, 2008.
- [2] Myers D.R.: Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality; Energy 30, 1517–1531, (2005).
- [3] Explicit validation of a surface shortwave radiation balance model over snow-covered complex terrain N. Helbig H. Löwe B. Mayer M. Lehning JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, D18113, 12 PP., 2010.
- [4] Infrared Detectors and Systems, E. L. Dereniak, G. D. Boreman Nowy Jork, Wiley 1996.

Zanieczyszczenia multikrystalicznego krzemu modyfikowanego procesem geterowania

dr hab. inż. TADEUSZ PIOTROWSKI¹⁾, dr PIOTR KRUSZEWSKI²⁾, dr MAREK LIPIŃSKI³⁾

¹⁾Instytut Technologii Elektronowej, Warszawa, ²⁾Instytut Fizyki PAN, Warszawa

³⁾Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków

Podstawowym parametrem, który charakteryzuje właściwości rekombinacyjne materiałów przeznaczonych na ogniwa słoneczne jest czas życia nadmiarowych nośników ładunku [1–4]. Na czas życia nośników zasadniczy wpływ mają metale [5, 6] zawarte w materiale przejściowym lub kontaminujące na powierzchni i rozdyfundowywane w objętości w czasie procesów termicznych. Procesy rekombinacyjne zachodzące z udziałem stanów energetycznych wytwarzanych przez metale są zasadniczą przyczyną redukcji czasu życia nośników ładunku. Ogromny postęp, jaki się dokonał w kilku ostatnich dekadach w technologii spowodował, że poziom koncentracji domieszek metali przejściowych w monokrystalicznym Si, może być bardzo niski $<1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Jednak w odróżnieniu od krzemu monokrystalicznego FZ-Si i Cz-Si, krzem multikrystaliczny (mc-Si) może zawierać szereg różnych metali przejściowych takich jak Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Co i Mo z okresu czwartego, Mo, Pd, Ag, Rh, Ru z okresu piątego oraz W, Os, Ir, Pt, Au z okresu szóstego metali przejściowych w podwyższonej koncentracji, rzędu $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ wytwarzających tzw. głębokie poziomy rekombinacyjne oraz znaczne koncentracje (10^{18} cm^{-3}) takich pierwiastków jak tlen i węgiel [5]. Dodatkowe miejsca rekombinacji tworzą defekty rozciągłe takie jak gęsta sieć granic ziaren, płaszczyzn poślizgu i dyslokacji. Pasywacja tych centrów rekombinacji poprzez procesy uwodorniania pozwala na zmniejszenie elektrycznej aktywności tych defektów [7].

Celem tej pracy było określenie rodzaju oraz koncentracji zanieczyszczeń metalicznych występujących w produkcyjnym mc-Si typu p, po procesie geterowania zewnętrznego fosforem [8, 9], definiujących czas życia nośników ładunku w tym materiale. Do pomiaru czasu życia nośników ładunku i okre-

ślenia koncentracji żelaza, które uważa się za główne zanieczyszczenie w mc-Si, wykorzystano pomiary zaniku fotoprowadnictwa w czasie, metodą mikrofalową (MWPCD), zaś do identyfikacji innych niż żelazo międzywęzłowe poziomów rekombinacyjnych zastosowano pomiary DLTS oparte o procedurę liczenia odwrotnej transformaty Laplace'a.

Badany materiał

Przedmiotem badań był krzem multikrystaliczny mc-Si typu p o rezystywności około $1 \Omega \text{ cm}$ ($1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) w postaci płytek o wymiarach $50 \times 50 \text{ mm}^2$ i grubości około $350 \mu\text{m}$ po procesie geterowania zewnętrznego fosforem. Proces dyfuzji fosforu przeprowadzono metodą klasyczną w rurze kwarcowej. Proces składał się z dwóch etapów: predyfuzji polegającej na naniesieniu szkliwa fosforowego (PSG) ze źródła POCl_3 w temperaturze 1113 K przez 20 min i następnie redyfuzji domieszki przez 20 min. W następnym etapie trawieniem chemicznym w roztworze kwasowym $\text{HF:HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ usunięto dwustronną warstwę dyfuzyjną n^+ uzyskując płytkę o grubości $300 \mu\text{m}$. Do pomiarów DLTS wykonano kontakty omowe z Al przy pomocy techniki sputtering, które wygrzano w atmosferze azotu w temperaturze $T = 673 \text{ K}$ przez 20 minut oraz bariery Schottky'ego z aluminium o średnicy $0,5 \text{ mm}$. Na płytkę przeznaczoną do pomiarów MWPCD naniesiono warstwę $\text{SiN}_x:\text{H}$ o grubości 80 nm przy użyciu metody RF PECVD dla temperatury podłoża $T = 573 \text{ K}$.

Dla porównania wykonano pomiary DLTS także na próbkach z mc-Si nie poddawanych procesowi geterowania – trawionej w KOH oraz trawionej w KOH z warstwą $\text{SiN}_x:\text{H}$ i następnie usuniętą do pomiarów.