



Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie



Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki  
Katedra Elektroniki

# **AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Opracowanie modelu wspomagającego proces  
obróbki termicznej materiałów  
fotowoltaicznych

Autor: mgr inż. Michał Warzecha

Promotor: prof. dr hab. Lidia J. Maksymowicz

Kraków 2010

# 1 Wstęp

Technologią pozwalającą na pozyskiwanie energii słonecznej, której stosowanie nie powoduje pogarszania się stanu środowiska jest technologia fotowoltaiczna. W ostatnich latach szczególne znaczenie uzyskały badania podstawowe i aplikacyjne dotyczące ogniw fotowoltaicznych wykonywanych na bazie polikrystalicznych warstw diselenku miedziowo-indowego,  $\text{CuInSe}_2$  (CIS). Podstawowe znaczenie w procesie otrzymywania warstw CIS ma termiczna obróbka cieplna (selenizacja), podczas której tworzy się półprzewodnikowa warstwa absorbera. Jakość otrzymywanych warstw jest bezpośrednio związana z możliwościami technicznymi urządzeń służących do obróbki cieplnej i z uzyskaniem zadowalającego profilu temperatury w trakcie procesu. Dlatego współcześnie znaczną uwagę poświęca się konstrukcji i badaniu urządzeń stosowanych w technologiach termicznych materiałów półprzewodnikowych. Bardzo istotne są metody szybkiej obróbki cieplnej (*Rapid Thermal Processing*, RTP) ze względu na możliwość indywidualnej obróbki pojedynczych partii materiałów, jak również optymalizację czasu procesu i zwiększenie wydajności produkcji.

Uzyskanie zadowalającego czasowego profilu temperatury w procesie selenizacji określa zakres prac badawczych związanych z modelowaniem zjawisk w trakcie obróbki termicznej oraz zjawisk występujących podczas pomiaru temperatury. Dążąc do jak największej użyteczności prowadzonych badań, znaczną część uwagi i nakładu pracy poświęcono na zbudowanie specjalistycznej aparatury badawczej (próżniowego systemu RTP) oraz opanowanie metod numerycznych pozwalających na opracowanie i wykorzystanie modelu matematycznego do sterowania procesem. W szczególności zastosowano techniki optymalizacyjne wykorzystywane w rozwiązywaniu nieliniowych układów równań różniczkowych. Badania modelowe przeprowadzono dla dwóch skonstruowanych urządzeń do szybkiej obróbki cieplnej RTP:

- układu pieca z gorącymi ścianami i ruchomym podajnikiem,
- układu pieca z zimnymi ścianami i lampami halogenowymi.

Podstawowym celem pracy było określenie możliwości zastosowania badań modelowych układu technologicznego do selenizacji warstw fotowoltaicznych CIS, a następnie wybór i realizacja koncepcji sterowania w czasie rzeczywistym. Użytkowym celem pracy było realizacja stanowisk laboratoryjnych do obróbki cieplnej materiałów warstwowych, wyposażonych w układy sterowania bazujące na opracowanym modelu matematycznym.

Tezy pracy zostały określone następująco:

**Teza I: Istnieje możliwość sformułowania modelu matematycznego układu technologicznego do selenizacji, odzwierciedlającego możliwie ściśle zjawiska zachodzące w systemie obróbki termicznej warstw prekursorów  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) oraz jego weryfikacji w oparciu o dane eksperymentalne.**

**Teza II: Istnieje możliwość wybrania i realizacji koncepcji sterowania w czasie rzeczywistym, zapewniającego wymaganą dokładność przebiegu procesu technologicznego.**

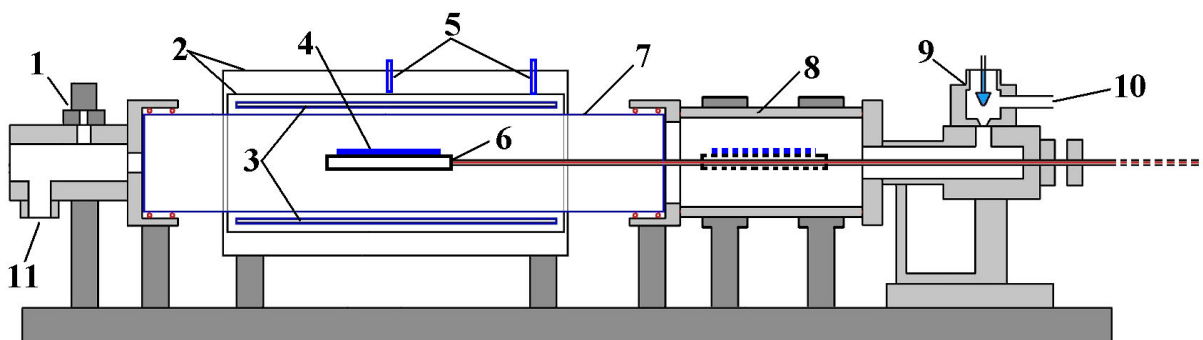
**Teza III: Istnieje możliwość konstrukcji sterownika i implementacji opracowanego algorytmu sterowania do stanowiska badawczego termicznej obróbki materiałów fotowoltaicznych oraz weryfikacji sposobu sterowania.**

## 2 Urządzenia do prowadzenia procesu próżniowej selenizacji

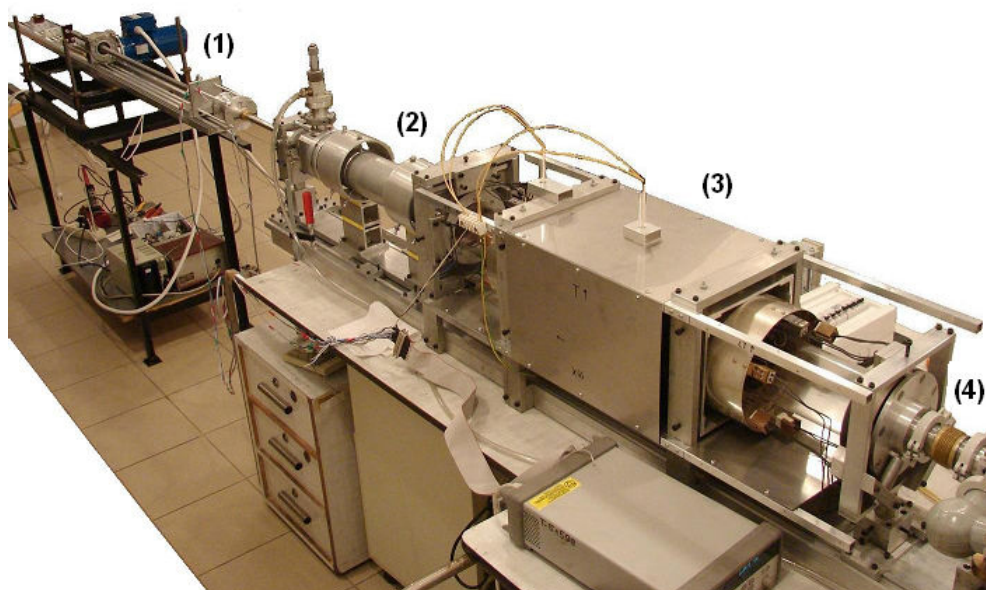
Urządzenia do wytwarzania półprzewodnikowych materiałów fotowoltaicznych muszą zapewniać odpowiednią temperaturę reaktora grafitowego, w którym znajdują się próbki cienkowarstwowe, a także kontrolę atmosfery (argon,  $10^{-1}$  Pa) w przestrzeni otaczającej kasetę grafitową. Zasadniczym problemem jaki należy rozwiązać konstruując urządzenie jest uniemożliwienie reagowania par selenu z metalowymi elementami konstrukcji, w szczególności z elementami grzejnymi. Dlatego we wszystkich urządzeniach do selenizacji reaktor umieszczono w próżnioszczelnej rurze kwarcowej, a elementy grzejne zamontowano poza obszarem próżni.

### 2.1 Piec z gorącymi ścianami i ruchomym podajnikiem

W standardowym piecu z gorącymi ścianami reaktor osiąga równowagę termiczną ze ścianami pieca. Urządzenie z ruchomym podajnikiem umożliwia umieszczenie reaktora w uprzednio nagrzanym piecu oraz wysunięcie poza jego obszar po zakończonym procesie. W ten sposób długotrwały proces nagrzewania i chłodzenia pieca może być dla reaktora niewidoczny, a prędkość zmiany temperatury osiąga wartość  $0,4^{\circ}\text{C s}^{-1}$ .



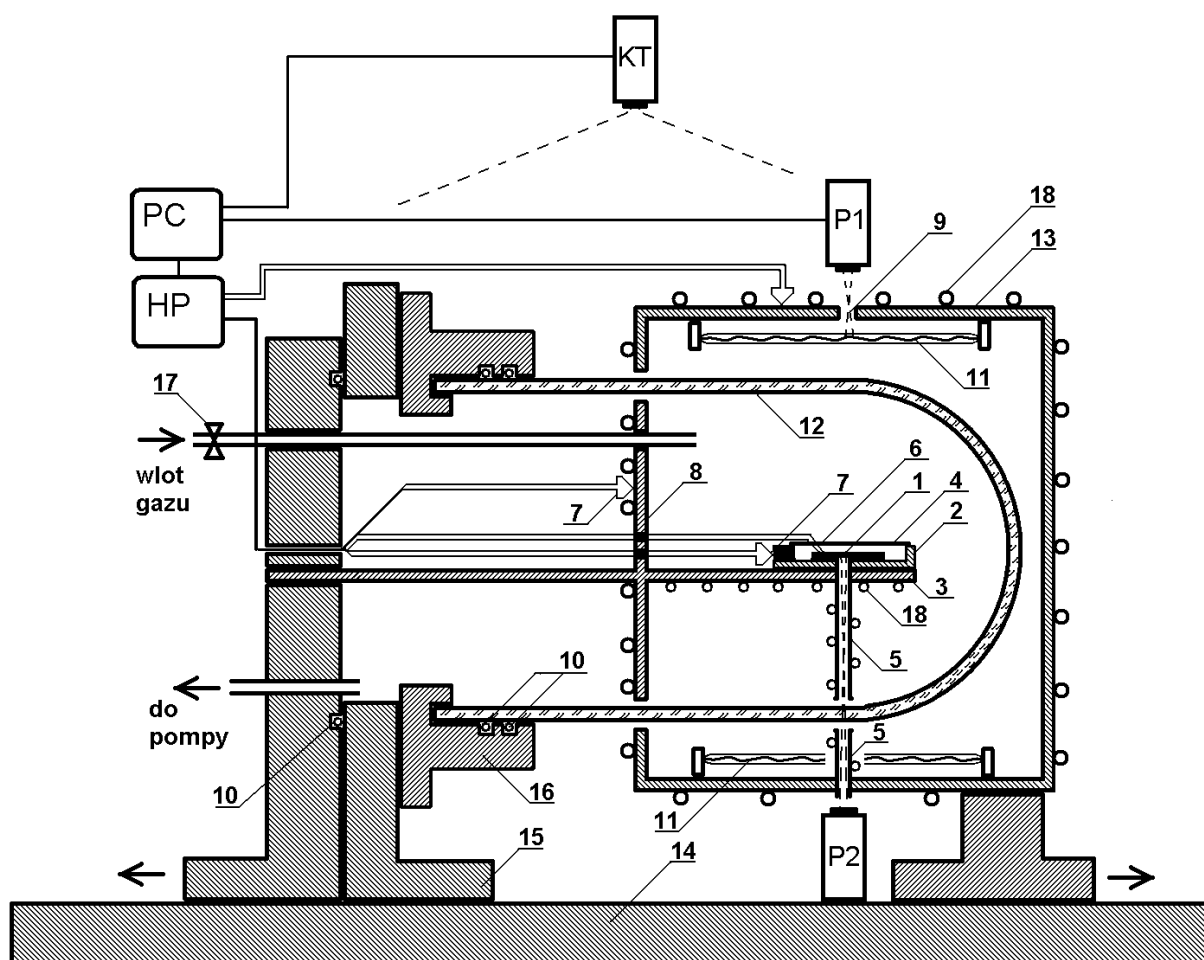
Rys. 2-1. Schemat pieca próżniowego z ruchomym podajnikiem (1 - próżniomierz, 2 - odbłyśniki, 3 - grzałki kantowe, 4 - próbka, 5 - czujniki temperatury, 6 - podajnik, 7 - rura kwarcowa, 8 - cylinder metalowy, 9 - zawór dozujący, 10 - wlot argonu, 11 - wylot do pompy).



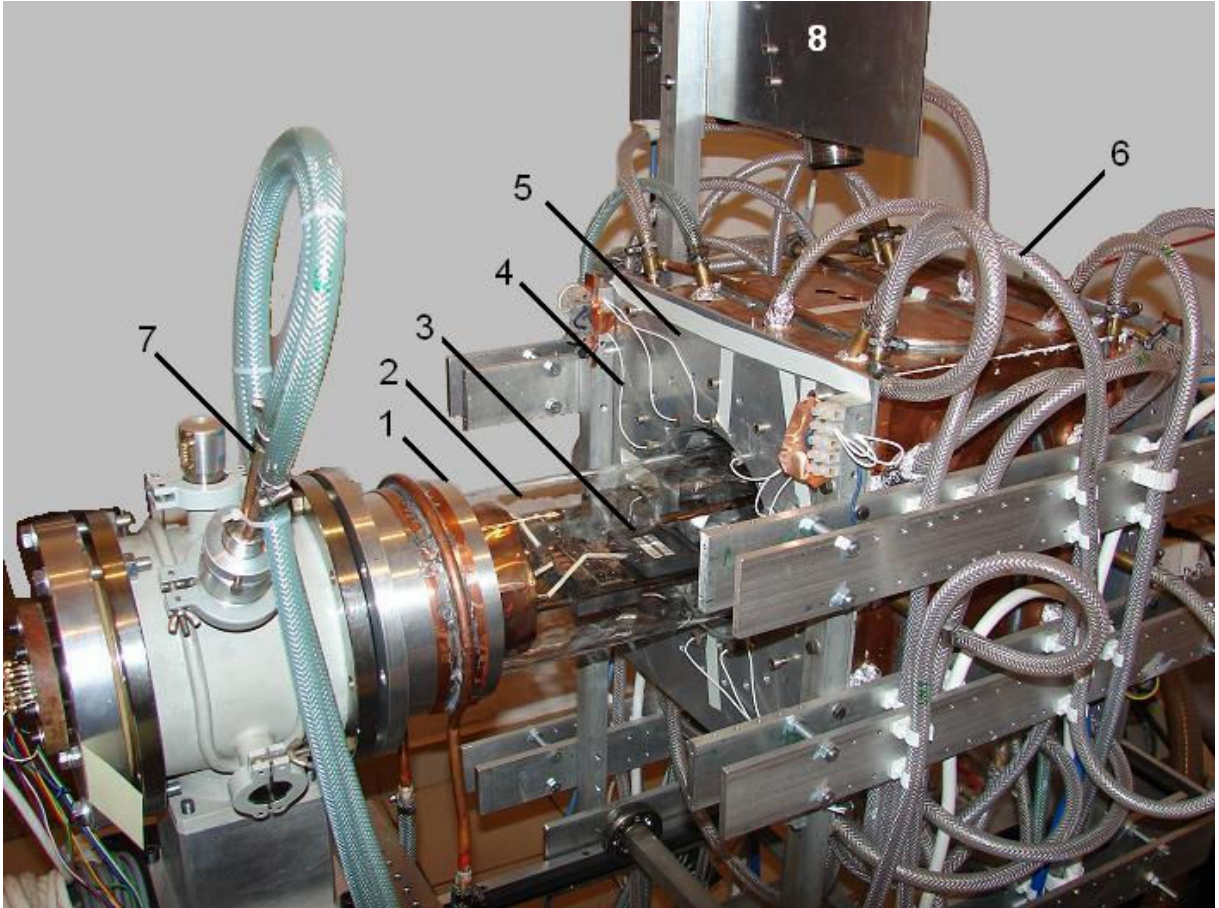
Rys. 2-2. Zdjęcie pieca z ruchomym podajnikiem (1 - napęd elektromechaniczny i posuw, 2 - zimna strefa, 3 - gorąca strefa, 4 - wylot do pompy próżniowej).

## 2.2 Piec z zimnymi ścianami

W przypadku pieca z gorącymi ścianami, czasy nagrzewania i chłodzenia reaktora z próbką są relatywnie długie. W celu przyspieszenia tych procesów, zbudowano nowe urządzenie o innej konstrukcji, w którym poprzez zainstalowanie lamp halogenowych, o łącznej mocy 18 kW, zapewniono odpowiednią moc i dynamikę grzania ( $10\text{K s}^{-1}$ ). Dla osiągnięcia efektu zimnych ścian, wprowadzono chłodzenie wodne elementów części grzewczej pieca. Komora procesowa zbudowana została w oparciu o klosz kwarcowy o średnicy 150 mm i wysokości 400 mm, zapewniający środowisko próżniowe, otoczony układem lamp halogenowych (Rys. 2-3). Lampy halogenowe zostały umieszczone w aluminiowych reflektorach, wyposażonych w chłodzenie wodne.



Rys. 2-3. Stanowisko kontrolno-pomiarowe do procesów RTP (1 - próbka, 2 - kasetta grafitowa, 3 - uchwyt, 4 - okienko kwarcowe, 5 - kolimator do pomiarów pirometrycznych, 6 - pomiar oporności, 7 - pomiar temperatury (Pt100), 8 - osłona termiczna domykająca, 9 - otwór do pirometrycznego pomiaru temperatury halogeny, 10 - uszczelnienia, 11 - halogen, 12 - klosz kwarcowy, 13 - zwierciadła komory grzewczej, 14 - lawa, 15 - wspornik klosza, 16 - uchwyt klosza, 17 - zawór dozujący gaz, 18 - wodna węzownica chłodząca, PC - komputer lub sterownik, P1, P2 - pirometry, HP - multimetr wielokanałowy, KT - kamera termowizyjna).



*Rys. 2-4. Zdjęcie stanowiska kontrolno-pomiarowego do procesów RTP (1 - uchwyt klosza kwarcowego, 2 - klosz kwarcowy, 3 - reaktor z próbką, 4 - przewód zasilający lampę halogenową, 5 – obudowa układu grzejnego, 6 - chłodzenie wodne reflektorów, 7 - chłodzenie wodne części próżniowej, 8 - wysięgnik z zainstalowanymi pirometrami).*

### 3 Modele termiczne urządzeń do selenizacji

Punkt wyjścia do podjętego w pracy modelowania stanowi model w przestrzeni stanu, którego strukturę oparto o fizyczne zjawiska transportu ciepła. Model ten opisuje radiacyjny transport rozbudowany dla przypadku propagacji promieniowania przez częściowo przezroczystą ścianę kwarcową komory próżniowej. Geometryczne zależności potrzebne do opisu transportu radiacyjnego zostały wyznaczone numerycznie z wykorzystaniem pakietu COMSOL.

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_i} \sum_{j \neq i} Q_{Rij} + Q_{Cij} + Q_{Ei}, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

$$Q_{Rij} = \overline{S_i S_j} \cdot k (T_i^4 - T_j^4) \quad (3.2)$$

$$Q_{Cij} = g_{ij} (T_i - T_j), \quad (3.3)$$

gdzie:

$C_i$  – pojemność termiczna i-tego elementu modelu,

$T_i$  – temperatura i-tego elementu (zmienna stanu),

$Q_{Rij}$  – strumień energii radiacyjnej,

$Q_{Cij}$  – strumień energii przewodzonej,

$Q_{Ei}$  – strumień energii dostarczonej przez elementy grzejne,

$\overline{S_i S_j}$  – powierzchnia wymiany całkowitej pomiędzy elementami i, j,

$g_{ij}$  – przewodność termiczna pomiędzy elementami i, j,

$k$  – stała Boltzmannna.

### 3.1 Model pieca próżniowego z gorącymi ścianami i ruchomym reaktorem

Zmiana położenia reaktora w rurze kwarcowej powoduje zmianę przestrzennej konfiguracji elementów pieca, która jest widoczna w zmianie współczynników równania (3.2), co w rezultacie uniemożliwia ich wyznaczenie. W tym przypadku, zagadnienie modelowania postawiono nieco inaczej. Wykorzystano termowizyjny pomiar rozkładu temperatury rury kwarcowej, którą uznano jako bezpośredni element grzejny oddziałujący na reaktor. Ruch reaktora w rurze został w modelu zastąpiony przesuwaniem znanego (zmierzonego) rozkładu temperatury rury na modelowany odcinek rury, w którym na stałe umieszczony jest reaktor. Ten odcinek rury został podzielony na segmenty, dla których określono współczynniki oddziaływania radiacyjnego  $S_{4i}$  w równaniu (3.4). Wektor stanu został poszerzony o zmienną  $x$  opisującą położenie reaktora w rurze.

$$\begin{bmatrix} \text{diag}(C) \cdot dT \\ dx \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \left( A_4 T^4 + \sum_{i=1}^n S_{4i} \left( T_{\text{tube}}^4(x, i) - T^4 \right) \right) + A_1 T \\ v \end{bmatrix} dt, \quad (3.4)$$

gdzie:

$T$  – wektor stanu reaktora,

$T_{\text{tube}(i)}$  – temperatura  $i$ -tego kawałka rury kwarcowej,

$C$  – wektor pojemności termicznych elementów reaktora,

$A_4$  – macierz oddziaływań radiacyjnych,

$A_1$  – macierz oddziaływań przez przewodzenie pomiędzy elementami reaktora,

$S_{4i}$  – wektor oddziaływań radiacyjnych elementów reaktora z  $i$ -tym elementem rury kwarcowej,

$k$  – stała Boltzmann,

$n$  – ilość elementów, na które podzielono odcinek rury kwarcowej oddziałujący na reaktor.

$x$  – położenie reaktora w rurze względem środka pieca,

$T_{\text{tube}(x,i)}$  – temperatura  $i$ -tego odcinka rury jeżeli reaktor znajduje się w pozycji  $x$ ,

$v$  – prędkość reaktora.

Takie przedstawienie modelu pozwala na wykorzystanie go w rzeczywistym urządzeniu gdzie sterowanie położeniem reaktora zrealizowane jest przez napęd elektromechaniczny zapewniający skokową zmianę prędkości, ograniczoną do dyskretnych wartości:  $-2, 0, 2 \text{ cm s}^{-1}$ .

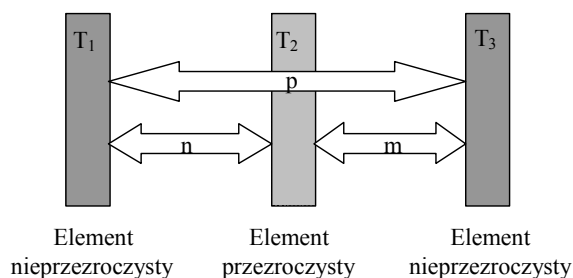
### 3.2 Modele pieca próżniowego z zimnymi ścianami

W urządzeniu z zimnymi ścianami i halogenowymi źródłami promieniowania, przezroczysta ściana kwarcowa pozwala na bezpośrednie oddziaływanie promieniowania lamp halogenowych na elementy znajdujące się w obszarze próżni. Częściowa widmowa przezroczystość kwarcu oraz ciągle widmo promieniowania termicznego powodują, że także ściana komory próżniowej staje się pośrednikiem tego oddziaływania. Brak wydajnego chłodzenia ściany kwarcowej powoduje zmiany jej temperatury, co wpływa na zmianę warunków pracy reaktora (kasety grafitowej).

Biorąc pod uwagę widmową przejrzystość szkła kwarcowego, która ma miejsce w zakresie od około  $0,2 \mu\text{m}$  do około  $4 \div 5 \mu\text{m}$  można zauważyć, że dla promieniowania, którego źródłem jest ciało o niskiej temperaturze, szkło kwarcowe będzie nieprzezroczyste, natomiast dla promieniowania ciał o wysokiej temperaturze, będzie ono medium przezroczystym.

Korzystając z modelu promieniowania Planck'a oraz zakładając dolnoprzepustowy (w dziedzinie długości fali) charakter szkła kwarcowego, wyznaczono zależność transmisji promieniowania przez ścianę kwarcową od temperatury elementu promieniującego  $e(T)$ . Wprowadzono następnie tą zależność do równania modelu.





**Rys. 3-1. Widmowy podział promieniowania dla przypadku radiacyjnego oddziaływania przez częściowo przezroczystą przegrodę kwarcową ( $p, n, m$  - opisane w równaniach (3.5)-(3.7)).**

Strumień energii wymienianych pomiędzy powierzchniami nieprzezroczystymi przez ścianę częściowo przezroczystą (Rys. 3-1) można opisać jako:

$$p = w_p k (T_1^4 e(T_1) - T_3^4 e(T_3)), \quad (3.5)$$

$$n = w_n k (T_1^4 (1 - e(T_1)) - T_2^4 (1 - e(T_2))), \quad (3.6)$$

$$m = w_m k (T_2^4 (1 - e(T_2)) - T_3^4 (1 - e(T_3))), \quad (3.7)$$

gdzie:

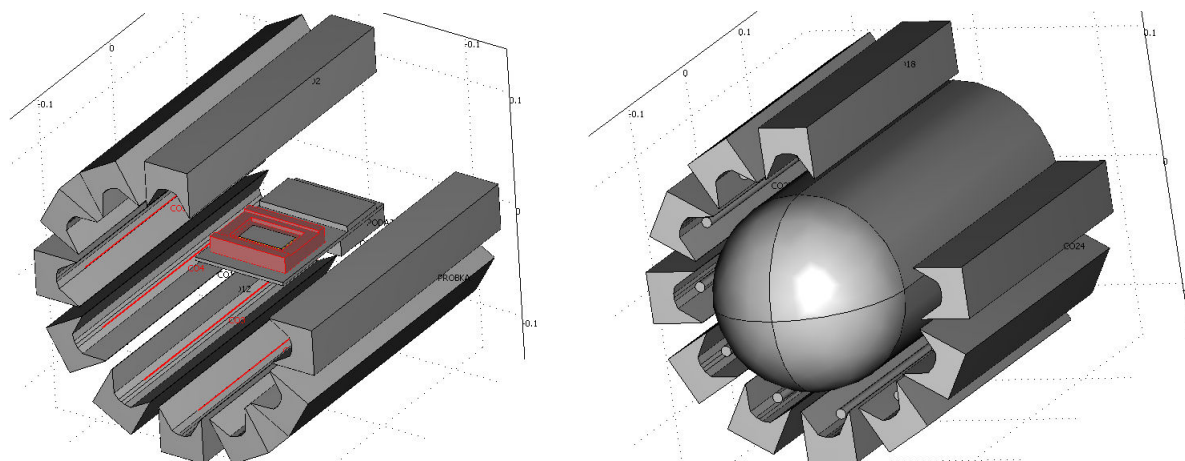
$w_p, w_n, w_m$  – współczynnik zawierający powierzchnię wymiany,

$k$  – stała Boltzmanna.

Równanie różniczkowe modelu uwzględniającego częściową przezroczystość kwarcu można zapisać następująco:

$$\text{diag}(C) \frac{dT}{dt} = e(T) A_H T^4 + (1 - e(T)) A_L T^4 + A_1 T + P(T, t). \quad (3.8)$$

Współczynniki odpowiedzialne za oddziaływania radiacyjne zgrupowane w  $A_L$  (kwarc nieprzezroczysty) i  $A_H$  (kwarc przezroczysty) oszacowano w środowisku COMSOL budując dwa przypadki modelu – z kwarcem i bez.



**Rys. 3-2. Modele MES zbudowane w środowisku COMSOL.**

### 3.3 Identyfikacja współczynników modelu

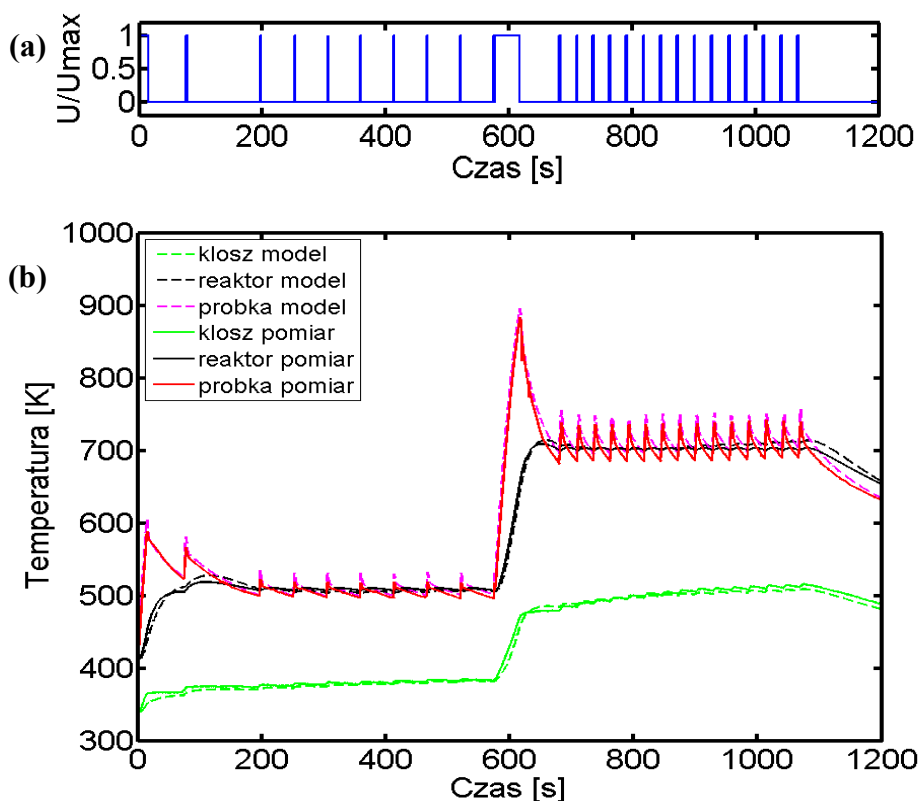
Nadanie współczynnikom równania stanu sensu fizycznego w procedurze modelowania teoretycznego nie rozwiązuje do końca problemu ich wartości. Dlatego też po uzyskaniu modelu teoretycznego prowadzi się procedurę identyfikacji parametrycznej dla skorygowania

wartości parametrów modelu w oparciu o posiadane dane eksperymentalne. Należy jednak podkreślić, że przygotowanie poprawnego modelu teoretycznego ma duże znaczenie, ponieważ optymalizacja funkcji nieliniowych może dawać różne rezultaty, zależne od stosowanej metody optymalizacji oraz punktu startowego. Model teoretyczny stanowi zatem punkt startowy oraz wyznacza ograniczenia dla procedury optymalizacyjnej prowadzącej do identyfikacji jego współczynników.

Do zrealizowania zadania identyfikacji współczynników wykorzystano kolokacyjną metodę rozwiązywania równań różniczkowych, pozwalającą przedstawić zbiór współczynników modelu i punktów rozwiązania równania jako zmienne decyzyjne optymalizacji.

### 3.4 Weryfikacja modelu

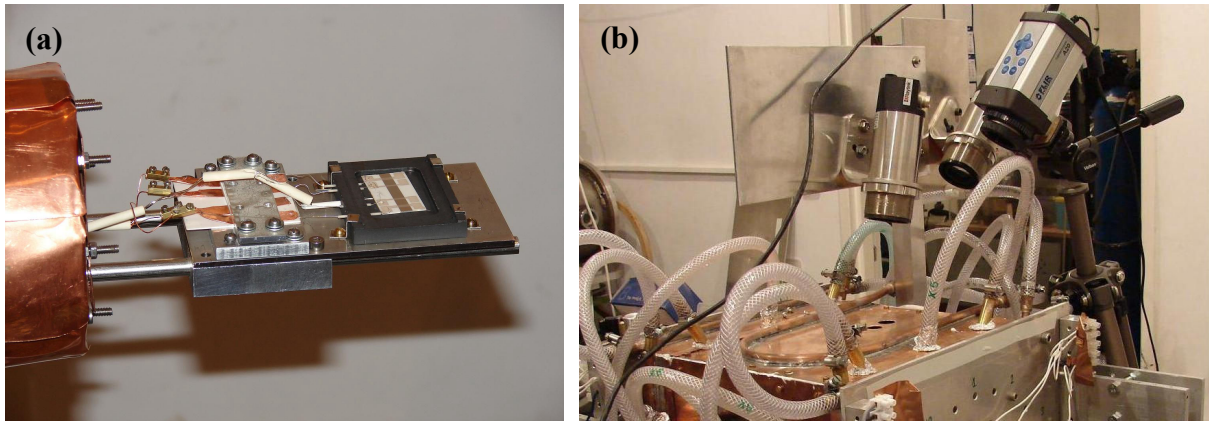
W celu weryfikacji, model został sprawdzony w oparciu o dane z 7 niezależnych eksperymentów. Miarą niedokładności modelu w stosunku do obiektu rzeczywistego jest błąd średniokwadratowy odwzorowania temperatury poszczególnych elementów urządzenia.



Rys. 3-3. Weryfikacja modelu po identyfikacji: (a) profil sterowania, (b) porównanie wyników pomiarów z symulacją; eksperyment nr 2.

Największym błędem (bezwzględnym) obarczone było odwzorowanie temperatury próbki, natomiast najmniejszym – temperatury klosza. Wynika to z faktu, że próbka ma znacznie wyższą temperaturę niż klosz. Na wielkość błędu ma również wpływ dokładność urządzeń pomiarowych. Temperatura próbki była mierzona za pomocą rezystora platynowego napyłonego na podłoże ceramiczne, który ma większy błąd niż czujnik Pt100, stosowany do pomiaru temperatury reaktora (Rys. 3-4a). Temperatura klosza była natomiast mierzona za pomocą kamery termowizyjnej (Rys. 3-4b).





Rys. 3-4. Zdjęcia prezentujące pomiar temperatury odpowiednich elementów:  
 (a) pomiar temperatury próbki i reaktora, (b) pomiar temperatury klosza.

Tab. 3-1. Błąd średniokwadratowy bezwzględny [K] odwzorowania temperatury elementów  
 wyznaczony w całym zakresie czasu eksperymentu.

Element	Numer eksperymentu						
	1	2	3	4	5	6	7
Próbka	18	10	13	15	13	15	16
Reaktor	8,3	5,9	12	11	12	10	17
Klosz	5,0	5,0	6,5	5,7	4,5	6,0	6,9

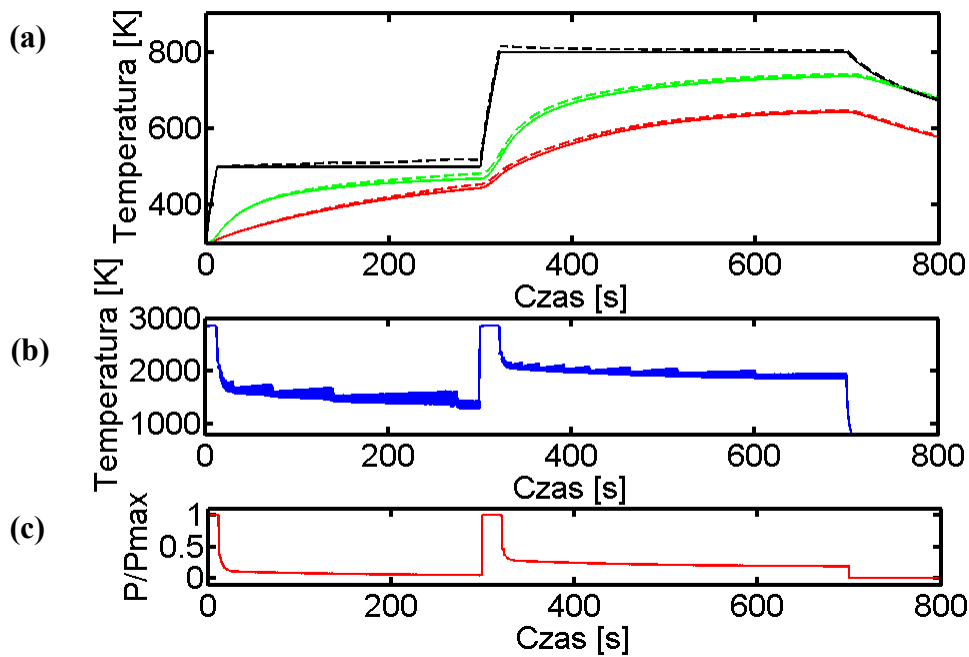
## 4 Zastosowanie modelu matematycznego w procedurze sterowania

Wyznaczenie sterowania to określenie momentów włączenia i wyłączenia zasilania lamp halogenowych lub w przypadku pieca z ruchomym podajnikiem – włączenia posuwu w odpowiednim kierunku. Celem sterowania jest uzyskanie założonej trajektorii temperatury reaktora. Praca urządzenia składa się typowo z kolejnych etapów wygrzewania, kiedy to temperatura reaktora jest stabilizowana i etapów przejściowych pomiędzy nimi. Praca sterownika może być osobno rozważana dla etapu stabilizacji i osobno dla etapu przejściowego. Stabilizacja w najprostszym przypadku może wykorzystywać zlinearyzowany model ze względu na stałość punktu pracy. Etap przejściowy związany jest ze znaczną zmianą punktu pracy urządzenia, dlatego linearyzacja daje gorsze efekty.

### 4.1 Sterowanie predykcyjne

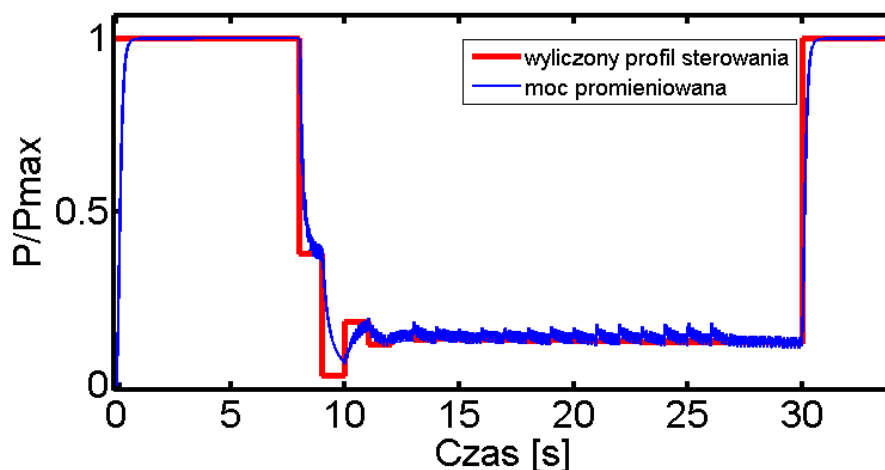
Sterowanie predykcyjne wykorzystujące model matematyczny (*Model Predictive Control*, MPC) pozwala na wyznaczenie sterowania w przyszłości z możliwością realizacji dowolnego ograniczenia nałożonego na ten sygnał. Jest to zaleta tego typu sterowania, wynikająca z faktu, że sterowanie nie jest wyznaczone w sprzężeniu zwrotnym.

Wykorzystując model matematyczny urządzenia do selenizacji, zrealizowano procedurę wyznaczania sterowania predykcyjnego, w którym horyzont predykcji został podzielony na odcinki o stałej długości. Przypadek horyzontu predykcji o długości 1s został wykorzystany do wyznaczenia trajektorii sterowania pokazanej na Rys. 4-1.



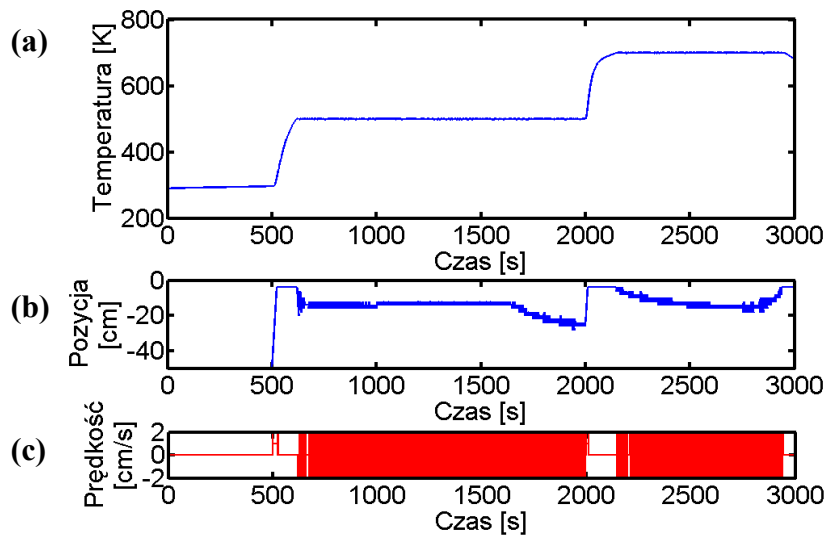
Rys. 4-1. Sterowanie predykcyjne temperaturą próbki: (a) trajektorie stanu dla wymuszenia wyliczonego przez sterownik i wygenerowanego przez modulator PWM, (b) temperatura żarnika sterowanego PWM, (c) sygnał sterujący (moc) wyliczony przez sterownik.

W przypadku urządzenia do selenizacji z grzaniem halogenowym, profil sterowania ograniczony jest do postaci binarnej z dyskretnym zarówno czasem, jak i wartościami sygnału sterującego. Zaproponowana modulacja PWM uwzględnia model żarnika, który jest nieliniowym, dynamicznym przetwornikiem binarnego sygnału napięciowego na ciągły sygnał mocy promieniowania. Zestawienie pary modulator i żarnik pozwala ukryć ograniczenia nałożone na sygnał sterujący związane z dyskretyzacją. Pozostaje ograniczenie amplitudy sygnału sterującego oraz ograniczenie prędkości zmiany tego sygnału wynikające z dynamiki żarnika (Rys. 4-2).

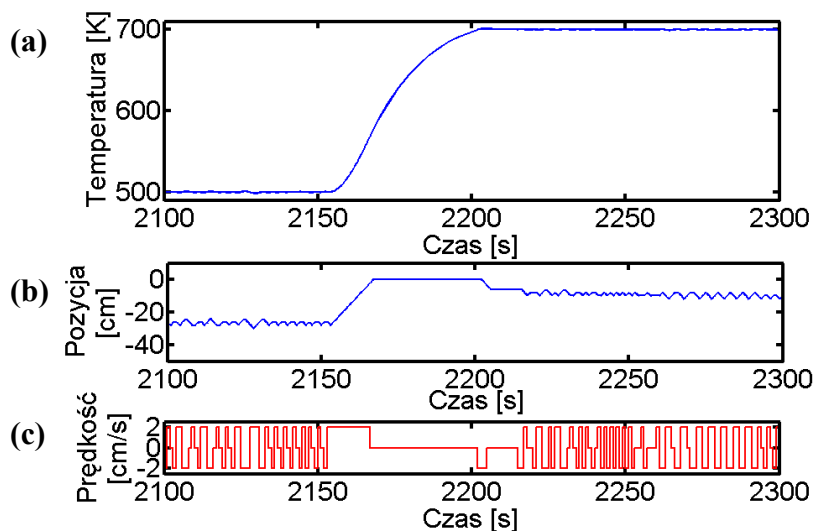


Rys. 4-2. Profil sterowania wyliczony przez sterownik (ograniczenia tylko na amplitudę sterowania) oraz moc promieniowana przez żarnik sterowany PWM realizujący wyliczony profil.

Sterowanie predykcyjne z krótkim horyzontem predykcji można także wykorzystać w przypadku urządzenia z ruchomym podajnikiem. W przypadku ruchu reaktora, zbiór możliwych sterowań (prędkość posuwu) jest trójelementowy ( $-2, 0, 2 \text{ cm s}^{-1}$ ). Podobnie jak w poprzednim przypadku, wprowadzono dyskretyzację czasu wyznaczoną horyzontem predykcji o długości 1 sekundy. W tak ograniczonym zbiorze sterowań wystarczy sprawdzić trzy możliwe wartości sterowania do rozwiązania modelu i wykorzystać najlepszy. Rezultat zastosowania takiego podejścia prezentuje Rys. 4-3. Wartość temperatury uzyskanej w wyniku tego sterowania jest zadowalająca, ale pojawiają się oscylacje powodowane dużymi zmianami pozycji reaktora. Zmniejszenie oscylacji następujących po etapie przejściowym uzyskano po wydłużeniu horyzontu predykcji dla tego etapu (Rys. 4-4).



Rys. 4-3. Sterowanie ruchomym podajnikiem wyznaczone z krótkim horyzontem predykcji – 1 s:  
(a) trajektoria temperatury reaktora, (b) pozycja reaktora, (c) prędkość reaktora.

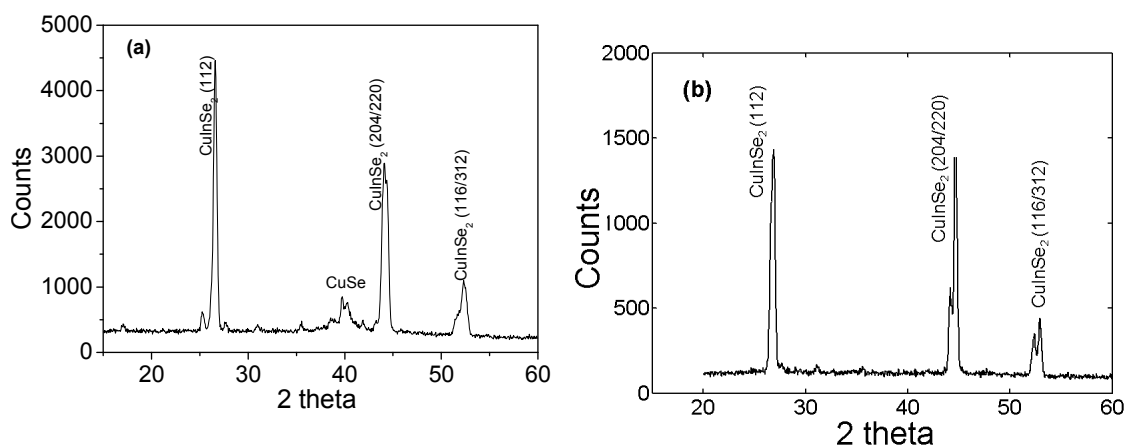


Rys. 4-4. Sterowanie predykcyjne w etapie przejściowym (między pierwszym a drugim etapem wygrzewania)  
(a) trajektoria temperatury reaktora, (b) pozycja reaktora, (c) prędkość reaktora.

## 4.2 Wyniki badań materiału fotowoltaicznego CIS, wytworzonego w urządzeniu

Zbudowane urządzenie do prowadzenia procesu RTP przetestowano przeprowadzając w nim realny proces selenizacji metalicznych prekursorów Cu/In. Właściwości uzyskanych warstw porównano z właściwościami warstw selenizowanych w zamkniętym reaktorze grafitowym, badając próbki za pomocą rentgenografii strukturalnej, XRD (Rys. 4-5). Zastosowanie mniejszego reaktora z oknem kwarcowym umożliwiło dużo szybsze podgrzanie próbki. Dodatkowo, zastosowanie ruchomego podajnika umożliwiło lepsze sterowanie temperaturą procesu.

Na podstawie wyników badań XRD stwierdzono, że próbki selenizowane w typowym zamkniętym reaktorze grafitowym zawierały pewne ilości fazy CuSe, która jest niepożądana. Natomiast materiał CIS otrzymany metodą RTP składał się wyłącznie z fazy CuInSe<sub>2</sub>. Taki materiał posiada dużo lepsze właściwości i może być wykorzystany jako składnik ogniwa fotowoltaicznego.



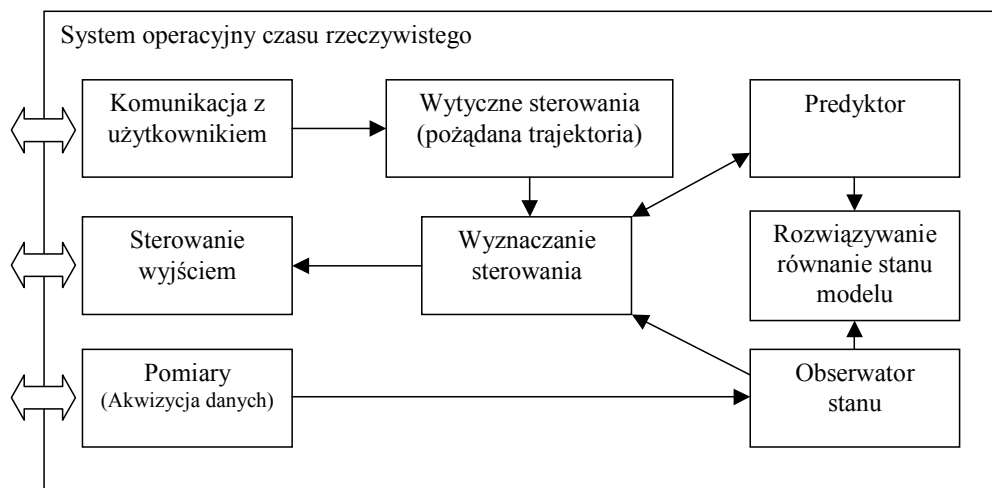
Rys. 4-5. Wyniki badania XRD materiału CIS otrzymanego w procesie selenizacji prowadzonej w zamkniętym reaktorze grafitowym (a) oraz metodą RTP w reaktorze z oknem kwarcowym (b).

## 5 Aplikacja realizująca sterowanie

Ze względu na modułowość zagadnienia jakim jest projekt sterownika, zdecydowano się na zastosowanie systemu operacyjnego czasu rzeczywistego (FreeRTOS). Pozwala on na niezależne projektowanie i uruchamianie kolejnych zadań realizujących pomiary, predykcję i obserwację stanu oraz komunikację z otoczeniem.

Wykorzystanie mechanizmów systemu operacyjnego czasu rzeczywistego pozwoliło zbudować aplikację z zachowaniem reżimów czasowych koniecznych do rozwiązania problemu prowadzenia pomiarów i sterowania.

W realizacji algorytmów całkowania równania modelu wykorzystano szczególne cechy przygotowanego modelu matematycznego (wydzielenie modelu żarnika halogenowego), co umożliwiło zwiększenie wydajności obliczeń oraz realizację algorytmu na układzie mikrokontrolera. Blokowy schemat aplikacji przedstawia Rys. 5-1.



*Rys. 5-1. Blokowy schemat aplikacji sterownika, wykorzystującej model termiczny do sterowania temperaturą w procesie obróbki termicznej.*

## 6 Podsumowanie

Aby osiągnąć założone cele zrealizowano następujące zadania:

- zbudowano stanowiska badawcze, konstrukcyjnie przewidziane do prowadzenia procesów RTP, zawierające szereg oryginalnych rozwiązań konstrukcyjnych,
- opracowano, wykorzystujący pirometry optyczne, układ pomiaru temperatury z kompensacją promieniowania zakłócającego w warunkach procesu RTP,
- wykorzystano teoretyczne podejście do modelowania, polegające na uwzględnieniu opisu zjawisk fizycznych w budowanym modelu matematycznym,
- zastosowano specjalizowane środowisko COMSOL do ilościowej analizy termicznych zjawisk przestrzennych,
- zbudowano model matematyczny w środowisku obliczeniowym MATLAB z wykorzystaniem techniki przestrzeni stanu,
- przeprowadzono procedurę dostrajania współczynników modelu z wykorzystaniem danych eksperymentalnych, stosując metodę kolokacyjną rozwiązywania równań różniczkowych,
- przeprowadzono weryfikację modelu matematycznego w oparciu o dane pomiarowe z kilku różnych eksperymentów,
- zaproponowano procedurę predykcyjnego sterowania temperaturą procesu w oparciu o uzyskane modele matematyczne,
- zbudowano mikroprocesorowy sterownik, umożliwiający realizację proponowanych sposobów sterowania,
- wykorzystano system operacyjny czasu rzeczywistego do budowy aplikacji sterownika na platformie mikrokontrolera. Aplikację podzielono na zadania realizujące pomiary, predykcję stanu, wyznaczanie sterowania oraz realizację profilu sterowania.

Uzyskane rezultaty odnoszą się bezpośrednio do sformułowanych we wstępie tez pracy. Opracowane modele układów technologicznych zostały pozytywnie zweryfikowane w oparciu o dane eksperymentalne. Wybraną koncepcję sterowania w czasie rzeczywistym przeniesiono do stanowiska badawczego. Przeprowadzona doświadczalnie eksploatacja urządzeń potwierdziła ich przydatność w laboratorium technologii cienkowarstwowych.

## Publikacje doktoranta związane z rozprawą:

1. H. Jankowski, T. Pisarkiewicz, C. Worek, **M. Warzecha**, J. Budzioch, Z. Pindel, „Próżniowa selenizacja warstw Cu-In-Se do zastosowań fotowoltaicznych”, Warszawa, Prace naukowe PW, Elektronika z. 143 (2003), s. 143-147.
2. H. Jankowski, J. Miller, T. Pisarkiewicz, **M. Warzecha**, C. Worek, “A model for a device with radiation heat transfer for selenization of Cu/In metallic precursors in photovoltaic applications”, Vacuum 75 (2004) 79-83.
3. H. Jankowski, M. Szczurkowski, T. Pisarkiewicz, **M. Warzecha**, C. Worek, „Sterowanie radiacyjnym transportem energii cieplnej w próżniowych systemach do wytwarzania materiałów fotowoltaicznych”, Warszawa, Prace naukowe PW, Elektronika z. 153 (2005), s. 137-140.
4. **M. Warzecha**, H. Jankowski, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, C. Worek, „Układ szybkiej obróbki cieplnej RTP do selenizacji materiałów fotowoltaicznych”, IX Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2006, Kraków - Zakopane 19-22 czerwca 2006, s. 339-342.
5. **M. Warzecha** „Thermal process modeling as a step in photovoltaic material technology improvement”, Tools of information technology : proceedings of the 1st conference : Rzeszów, Poland 15 September 2006 s. 114–119.
6. **M. Warzecha**, H. Jankowski, T. Pisarkiewicz „Control of radiation heat transfer in vacuum system for the preparation of chalcopyrite films”, 21 European photovoltaic solar energy conference proceedings, Dresden, Germany 4-8 September 2006 s.2023-2027.
7. **M. Warzecha**, H. Jankowski, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, C. Worek, “Rapid temperature processing (RTP) system for selenization of photovoltaic materials”, Proceedings of SPIE Vol.6348, 2006, s. 634808-1–634808-5.
8. H. Jankowski, T. Kenig, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, **M. Warzecha**: „Technologia heterozłącza CIS/CdS do zastosowańmetalicznych”, Elektronika (XLVIII) nr 10(2007), s. 32-34.
9. **M. Warzecha**, H. Jankowski, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, “Modular process control system for photovoltaic thin films manufacturing”, Vacuum 82 (2008) s.1107-1110.
10. **M. Warzecha**, H. Jankowski, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, „Pomiary pirometryczne w modelowaniu termicznym lampy halogenowej stosowanej w procesie RTP”, Elektronika 6(2008), s. 201–202.
11. **M. Warzecha**, H. Jankowski, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, „Sterowanie radiacyjnym transportem ciepła w układzie szybkiej obróbki termicznej (RTP)”, materiały konferencji zorganizowanej z okazji Jubileuszu 90-lecia AGH : Kraków, 28–29 maja 2009 s.109–110.
12. **M. Warzecha**, H. Jankowski, T. Kenig, L. Maksymowicz, T. Pisarkiewicz, „Sterowanie MBS termicznym procesem próżniowej selenizacji warstw fotowoltaicznych”, Elektronika 5/2010, s.98.