

## Predykcyjna kontrola procesów wymiany jonowej w szklach

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono metodę kontroli procesów dyfuzyjnego domieszkowania szkieł realizowaną w rzeczywistym czasie trwania procesu. Bazuje ona na rozwiązywaniu równania dyfuzji w kolejnych krokach czasowych z uwzględnieniem rzeczywistej temperatury procesu. Aktualna wartość temperatury pozwala na podstawie charakterystyk temperaturowych współczynników dyfuzji wyznaczać ich chwilowe wartości. Metoda ta znajduje zastosowania w procesach wytwarzania gradientowych światłowodów planarnych techniką wymiany jonów.

**Abstract.** The paper presents a method of controlling diffusion glass doping processes realized in the real time of the process. This method is based on solving of the diffusion equation in subsequent time steps, taking into account of the current process temperature. On the basis of the temperature characteristics of the diffusion coefficients, their instantaneous values can be determined. This method is used in the production of the gradient planar optical waveguides using the ion exchange technique. (**Predictive control of ion exchange processes in glasses**)

**Słowa kluczowe:** wymiana jonowa w szklach, równanie dyfuzji, światłowody planarne, kontrola procesów.

**Keywords:** ion exchange in glass, diffusion equation, planar waveguides, process control.

### Wstęp

Wymiana jonowa w szklach jest metodą technologiczną stosowaną od kilkudziesięciu lat do wytwarzania gradientowych zmian współczynnika załamania szkieł [1-4]. Szkło jest bardzo dobrym materiałem optycznym. Charakteryzują go niskie koszty materiałowe, niskie straty propagacyjne, duża stabilność właściwości optycznych oraz kompatybilność ze światłowodami włóknistymi. Z kolei technika wymiany jonów jako proces technologiczny zapewnia prostotę i oszczędność, niewymagając skomplikowanego sprzętu produkcyjnego.

Wymienione cechy zapoczątkowały na początku lat 80. ubiegłego wieku bardzo szybki rozwój nowej dziedziny optyki zwanej optyką zintegrowaną [5,6]. Od tamtej pory opublikowano tysiące artykułów związanych z różnymi aspektami tej nowej dziedziny. Przegląd tych nowych zastosowań jak również badania podstawowe zostały ujęte w różnych pracach przeglądowych [7-11]. W raportowanych badaniach stosowano różne źródła jonów domieszek w odniesieniu do różnych szkieł [12-15]. Stosowane były oprócz procesów dyfuzyjnych procesy wspomagane polem elektrycznym (elektrodyfuzja) [16]. Wytwarzane światłowody paskowe poddawano dodatkowym procesom dyfuzji wtórnej obniżającej współczynnik załamania od strony powierzchni szkła celem uzyskania profili refrakcyjnych zbliżonych do symetrii osiowej, jaką posiadają włókna optyczne [18]. Równoległe z wytwarzaniem elementów optycznych rozwinęły się techniki pomiarowe mające na celu charakteryzację ich właściwości refrakcyjnych [19]. Stworzono opisy matematyczne procesów technologicznych umożliwiające ich modelowanie [20].

Cechą charakterystyczną metody wymiany jonów są uzyskiwane małe zmiany współczynnika załamania w szklach ( $\Delta n \sim 0,1$ ). Wskutek tego wytwarzane tą metodą elementy nie pozwalają na uzyskanie dużego stopnia ich integracji na podłożach szklanych.

Obecnie platformy materiałowe bazujące na półprzewodnikach (krzem, fosforek indu) lub dielektrykach (azotek krzemu) pozwalają ze względu na ich duże współczynniki załamania wytwarzać elementy optyczne o dużym stopniu integracji [21]. Obiecującą ze względu na koszty materiałowe i aparaturowe oraz bardzo dobre właściwości optyczne wytwarzanych warstw jest obecnie metoda zol-żel [22]. W dziedzinie optyki planarnej metoda ta bazuje na podłożach szklanych. Możliwe zatem jest tworzenie struktur hybrydowych o refrakcji gradientowej w podłożu szklanym (wymiana jonowa) i refrakcji step-index naniesionej na podłożu warstwy (metoda zol-żel) [23]. W takim aspekcie

metoda wymiany jonów może być wykorzystywana jako technika uzupełniająca.

Na chwilę obecną metoda wymiany jonów w zakresie wytwarzania, charakteryzacji i modelowania światłowodów planarnych posiada dobrze opisany potencjał aplikacyjny [24].

W niniejszej pracy przedstawiono możliwości modelowania gradientowych zmian refrakcji szkła w rzeczywistym czasie procesów dyfuzyjnego domieszkowania szkieł. Uwzględniono tu procesy dyfuzji wstępnej i wtórnej oraz procesy wygrzewania.

### Technologiczność procesów dyfuzyjnego domieszkowania szkieł

Kontrola procesów technologicznych jest niezbędna we wszelkiego rodzaju technikach wytwarzania. Kontrola taka ma na celu zmaksymalizować uzysk technologiczny rozumiany jak procent efektów technologicznych spełniających założone wymagania.

Kontrolę taką możemy podzielić na dwie klasy. Podział taki będzie związany z możliwością kontroli wpływu parametrów procesów na efekt końcowy. W takim podziale od pierwszej takiej klasy zaliczymy sztywno zachowywany zbiór parametrów danego procesu technologicznego. Parametry takie są zadawane jako niezmiennające się. Możliwa jest ewentualna ich korekta w czasie trwania procesu. Nie ma tu jednak sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym pomiędzy efektem technologicznym a parametrem (parametrami) mającymi wpływ na skalę tego efektu.

Przykładem ilustrującym mogą tu być wszelkiego rodzaju technologie bazujące na procesach dyfuzji termicznej. Efekty takich procesów są zależne od czasu i temperatury ich realizacji. W takim przypadku istotnym parametrem technologicznym jest właśnie temperatura procesu. Zapewnienie jej stałości lub utrzymanie w założonym dopuszczalnym przedziale zmian skutkuje uzyskaniem końcowego efektu technologicznego w granicach dopuszczalnej tolerancji.

Do drugiej klasy kontroli procesów technologicznych zaliczymy takie, w których możliwa jest modelowa symulacja wpływu parametrów tych procesów na końcowy efekt technologiczny. W takich procesach monitoring parametrów procesu w rzeczywistym czasie ich realizacji umożliwia uzyskanie sprzężenia zwrotnego pomiędzy kontrolowanymi w czasie parametrami procesu a symulowanym na bieżąco efektem technologicznym. Tutaj znowu odpowiednią ilustracją będą procesy dyfuzji termicznej.

Znajomość zależności temperaturowych współczynników dyfuzji umożliwia matematyczne modelowanie takiego zjawiska. Modelowanie takie może być realizowane w czasie rzeczywistym na podstawie monitorowania przebiegu temperatury danego procesu. Informacja wynikająca z przyjętego modelu zjawiska pozwala utworzyć sprzężenie zwrotne umożliwiające uzyskanie precyzyjnego wpływu na końcowy efekt technologiczny.

### Matematyczny model procesów wymiany jonowej w szklach

W modelowaniu procesów wymiany jonowej przyjęto zależność współczynników dyfuzji:  $D_A$  (domieszki wprowadzanej do szkła) i  $D_B$  (mobilnych jonów szkła) od unormowanej koncentracji  $u$  jonów domieszki i temperatury procesu  $T$  w postaci [24]:

$$(1) \quad D_A(u, T) = D_{0A}(T)e^{Au}, \quad D_B(u, T) = D_{0B}(T)e^{B(1-u)}$$

Zależność współczynników dyfuzji od temperatury bezwzględnej  $T$  opisuje równanie Arrheniusa:

$$(2) \quad D_{0i}(T) = D_{0i}^*(T) \exp\left(-\frac{\Delta Q_i}{RT}\right) \quad (i = A, B),$$

gdzie:  $\Delta Q_i$  – energia aktywacji jonów typu  $i$ ,  $R$  – uniwersalna stała gazowa,  $D_{0i}^*$  ( $i=A, B$ ),  $A$  i  $B$  są współczynnikami niezależnymi od temperatury.

W przypadku jednowymiarowym równanie dyfuzji opisujące czasowo-przestrzenną dystrybucję unormowanej koncentracji jonów domieszki wprowadzanej do szkła przyjmuje postać [25]:

$$(3) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{D_{0A}e^{Au}}{1-\alpha u} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{A - (A+B)u + \alpha(1+uB)}{1-\alpha u} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$\alpha(u) = 1 - \frac{D_{0A}}{e^B D_{0B}} e^{(A+B)u}$$

Z założenia o proporcjonalności zmian współczynnika załamania światła do koncentracji wprowadzonej domieszki [4] wynika relacja dla współczynnika załamania (przypadek 1-wymiarowy):

$$(4) \quad n(x, t) = n_b + \Delta n_s \cdot u(x, t)$$

W powyższym równaniu  $n(x, t)$  jest bezwzględną wartością współczynnika załamania szkła,  $n_b$  jest współczynnikiem załamania szkła niedomieszkowanego,  $\Delta n_s$  jest maksymalną zmianą współczynnika załamania przy powierzchni szkła osiąganą przy nieskończeniu długim czasie dyfuzji (przy zachowaniu stałej wydajności źródła domieszki) a funkcja  $u(x, t)$  jest rozwiązaniem równania (3) dla danego czasu procesu dyfuzji. Z punktu widzenia mechanizmu zjawiska wymiany jonowej, będącego skutkiem wprowadzania do szkła jonów domieszki, zachodzi tu zjawisko dynamicznego ustalania się stanu równowagi na granicy ośrodków szkło-źródło domieszki. Osiągany stan równowagi charakteryzuje się stałą czasową  $\tau_d$ . W związku z tym koncentracja domieszki przy powierzchni szkła osiąga pewną wartość maksymalną dopiero po ustaleniu się stanu równowagi [26]:

$$(5) \quad u(0, t) = 1 - a_d e^{-t/\tau_d},$$

gdzie:  $a_d$  – współczynnik określający minimalną wartość  $u(0, 0)$ ,  $\tau_d$  – stała czasowa określająca, po jakim czasie proces wymiany na granicy szkło-źródło domieszki osiąga stan równowagi.

Zależność (5) znajduje zastosowanie w rozwiązywaniu równania (3) dla krótkotrwałych procesów dyfuzji wstępnej. Parametry  $a_d$  i  $\tau_d$  są wyznaczane na podstawie pomiarów efektywnych współczynników załamania modów planarnych światłowodów kilkumodowych [28]. Asymptotyczną wartość  $\Delta n_s$  wyznacza się z pomiarów profili refrakcyjnych światłowodów planarnych wytwarzanych w długich procesach dyfuzji.

### Procesy dyfuzji wstępnej

Przyjęte warunki graniczne dla rozwiązywania równania dyfuzji (3) w takim procesie to: brak domieszki w szkłe na początku procesu i ustalająca się wartość unormowanej koncentracji domieszki w obszarze przypowierzchniowym szkła:

$$(6) \quad \begin{aligned} u(x, 0) &= 0 & \text{dla } x \geq 0 \\ u(0, t) &= 1 - a_d e^{-t/\tau_d} & \text{dla } t \geq 0 \end{aligned}$$

### Procesy dyfuzji wtórnej

W dalszym ciągu w tego typu procesach zakłada się stosowanie tego samego rodzaju jonów domieszki. W modelowaniu takiego procesu występuje początkowa dystrybucja domieszki opisywana funkcją  $u_0(x)$ . Warunki graniczne dla takiego procesu mają postać:

$$(7) \quad \begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x) & \text{dla } x \geq 0 \\ u(0, t) &= 1 - a_d e^{-(t+t_d)/\tau_d} & \text{dla } t \geq 0 \end{aligned}$$

W powyższym warunku brzegowym  $t_d$  jest dotychczasowym czasem procesu dyfuzji.

### Procesy wygrzewania

Procesy wygrzewania są realizowane, gdy w szkłe występuje już początkowa dystrybucja domieszki opisywana funkcją  $u_0(x)$ . Z istoty takiego procesu wynika, że ani do objętości szkła ani na zewnątrz z niego nie ma przepływu domieszki. Tak więc w modelowym opisie tego procesu całkowita ilość domieszki w szkłe pozostaje stała. Warunkiem brzegowym dla równania (3) będzie zatem zerowa wartość unormowanego strumienia domieszki przez powierzchnię szkła. W takim przypadku warunki graniczne dla procesu wygrzewania przyjmują postać:

$$(8) \quad \begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x) & \text{dla } x \geq 0 \\ \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} &= 0 & \text{dla } t \geq 0 \end{aligned}$$

### Niejawna metoda rozwiązywania równania dyfuzji

W modelowaniu procesów dyfuzji do rozwiązywania równania (3) przyjęto metodę Cranka-Nicholsona [27]. Jej zaletą jest bezwzględna stabilność rozwiązania. Posiada ona dokładność drugiego rzędu ze względu na krok czasowy  $\Delta t$  jak i krok przestrzenny  $\Delta$ . Zgodnie z tą metodą dyskretyzacja pochodnej czasowej i pochodnych przestrzennych do równania (3) ma postać:

$$(9) \quad \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{u_i^{k+1} - u_i^k}{\Delta t}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{u_{i+1}^{k+1} - u_{i-1}^{k+1} + u_{i+1}^k - u_{i-1}^k}{4\Delta}; \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{u_{i+1}^{k+1} - 2u_i^{k+1} + u_{i-1}^{k+1} + u_{i+1}^k - u_i^k + u_{i-1}^k}{2\Delta^2}; \end{aligned}$$

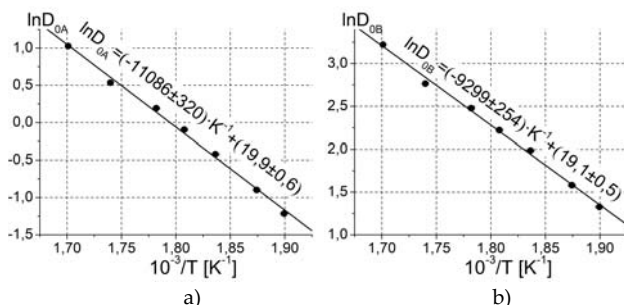
$$\begin{aligned}
& \delta P \left( e^{Au_i^{k+1}} + e^{Au_i^k} \right) \left\{ \left( u_i^{k+1} + u_i^k \right) \left[ C \left( e^{Eu_i^{k+1}} + e^{Eu_i^k} \right) - \frac{I}{2} \right] + I \right\} \left( u_{i+1}^{k+1} - 2u_i^{k+1} + u_{i-1}^{k+1} + u_{i+1}^k - 2u_i^k + u_{i-1}^k \right) + \\
(10) \quad & P \left( e^{Au_i^{k+1}} + e^{Au_i^k} \right) \left\{ A - \frac{E}{2} \left( u_i^{k+1} + u_i^k \right) + I - 2C \left( e^{Eu_i^{k+1}} + e^{Eu_i^k} \right) + \frac{B}{2} \left( u_i^{k+1} + u_i^k \right) \left[ I - 2C \left( e^{Eu_i^{k+1}} + e^{Eu_i^k} \right) \right] \right\} \times \\
& \times \left( u_{i+1}^{k+1} - u_{i-1}^{k+1} + u_{i+1}^k - u_{i-1}^k \right)^2 - R \left\{ \left( u_i^{k+1} + u_i^k \right) \left[ C \left( e^{Eu_i^{k+1}} + e^{Eu_i^k} \right) - \frac{I}{2} \right] + I \right\}^2 \left( u_i^{k+1} - u_i^k \right) = 0
\end{aligned}$$

Wprowadzając oznaczenia:  $C=D_{0A}/(4e^B D_{0B})$ ,  $E=A+B$ ,  $P=0,5D_{0A}\Delta t$  i  $R=16\Delta^2$  utworzony tą metodą schemat różnicowy równania dyfuzji (3) prowadzi do układu równań nieliniowych (10). Niewiadomymi są tu:  $u_{i-1}^{k+1}$ ,  $u_i^{k+1}$ ,  $u_{i+1}^{k+1}$  dla  $i=1,2,\dots,n-1$  na każdym kroku czasowym. Ilość równań tego układu odpowiada tu przyjętej ilości  $n$  węzłów siatki, na której rozwiązywane jest równanie dyfuzji.

Rozwiązanie końcowe układu równań (10) uzyskiwane jest metodą iteracyjną. Wymagana tu jest przybliżona początkowa postać rozwiązania dana w  $n$  węzłach. Ilość iteracji wynika z podziału czasu dyfuzji  $t_{dyf}$  na kroki czasowe  $\Delta t$ . Nieliniowy układ równań (10) rozwiązywany jest metodą Newtona [29].

### Zależność współczynników dyfuzji od temperatury

Zagadnienie to odgrywa kluczową rolę w modelowaniu procesów w rzeczywistym czasie ich realizacji. Do pełnego określenia zależności  $D_{0A}(u,T)$  i  $D_{0B}(u,T)$  potrzebna jest znajomość dwóch współczynników  $D_{0i}^*$  oraz  $\Delta Q_i$  ( $i=A,B$ ). Pozostałe dwa współczynniki  $A$  i  $B$  jak już wspomniano nie zależą od temperatury. Sposób wyznaczania wymienionych współczynników, jak również zależności funkcyjnych  $D_{0A}(T)$  i  $D_{0B}(T)$  został opisany w pracach [24,28]. Otrzymane charakterystyki temperaturowe  $D_{0A}(T)$  i  $D_{0B}(T)$  pozwalają na bieżąco modelować kinetykę procesów wymiany jonowej w szkle.



Rys.1. Wyznaczone charakterystyki temperaturowe współczynników dyfuzji dla wymiany jonowej  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  w szkle sodowo-wapniowym

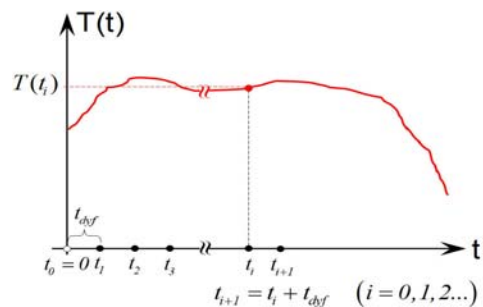
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe charakterystyki temperaturowe współczynników dyfuzji  $D_{0A}(T)$  i  $D_{0B}(T)$  wyznaczone dla wymiany jonowej  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  realizowanej w szklach sodowo-wapniowych.

### Rozwiązywanie równania dyfuzji w rzeczywistym czasie realizacji procesu technologicznego

Realizując proces wymiany jonów w szkle, kontroli podlega jego temperatura jako funkcja czasu  $T(t)$ . Idea modelowania takiego procesu w rzeczywistym czasie jego trwania zakłada ciągłe próbkowanie funkcji  $T(t)$  z okresem czasu  $t_{dyf}$ . Chwile próbkowania czasu  $t_i$  spełniają zatem relację:  $t_{i+1} = t_i + t_{dyf}$  ( $i=0,1,\dots$ ), gdzie  $t_0=0$  (rys.2).

Na podstawie zmierzonej temperatury  $T_i=T(t_i)$  na początku każdego takiego-go przedziału czasu w chwili  $t_i$  obliczane są  $D_{0A}(T_i)$  i  $D_{0B}(T_i)$ . Są one przyjmowane jako niezmiennicze w czasie  $t_{dyf}$ .

Przy takich wartościach współczynników dyfuzji jest rozwiązywane równanie (3). Rozwiązanie tego równania określa funkcję unormowanej koncentracji domieszki  $u_i(x)$  uzyskaną w czasie  $t_{dyf}$  dla ustalonej temperatury  $T_i$ . Funkcja ta staje się warunkiem początkowym do rozwiązywania równania dyfuzji w następnym przedziale czasowym zapoczątkowanym w chwili  $t_{i+1}$ .



Rys.2. Zasada próbkowania temperatury procesu

Ten sposób obliczeń pozwala kontrolować postać rozwiązania równania dyfuzji w kolejnych etapach czasowych. Nie ma tu żadnych ograniczeń czasu trwania procesu. Wybór okresu  $t_{dyf}$  próbkowania temperatury powinien uwzględniać czas obliczeń numerycznych. Decydującą rolę odgrywa tu ilość  $n$  węzłów siatki obliczeń.

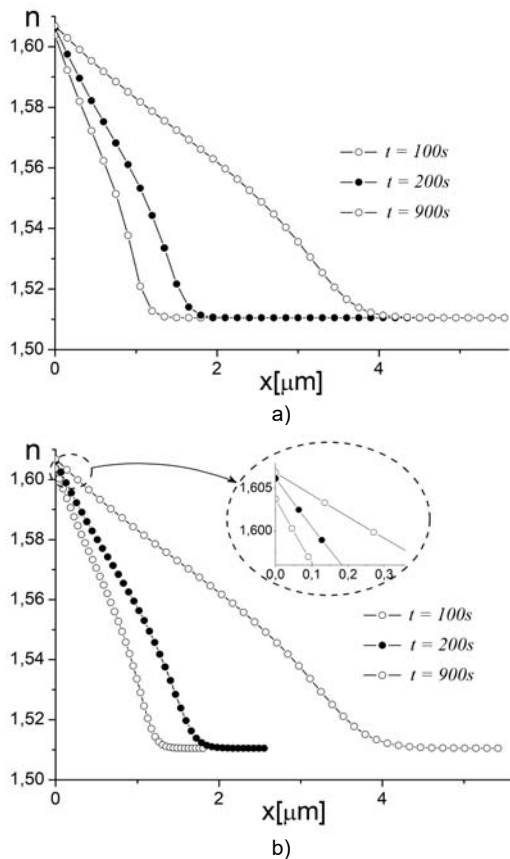
### Zagadnienie siatki rozwiązania równania dyfuzji

Rozwiązywanie jednowymiarowego równania dyfuzji odbywa się na siatce współrzędnych (oś  $X$ ). Zasięg dyfuzji jest tu określany w krotnościach  $(Dt)^{1/2}$  [27], gdzie  $D$  i  $t$  oznaczają odpowiednio współczynnik dyfuzji i czas jej trwania. W przypadku modelowania procesu w czasie rzeczywistym możliwe jest przyjęcie dwóch rodzajów siatki współrzędnych: statycznej lub dynamicznej. Gdy znany jest z góry czas realizacji procesu można wtedy rozwiązywać równanie dyfuzji na siatce statycznej o założonej maksymalnej wartości współrzędnej  $x$ . Wartość ta może być oszacowana przy znajomości średniej temperatury procesu. Jednak takie postępowanie dopuszcza małą precyzję rozwiązania równania w początkowych chwilach procesu.

Zastosowanie siatki dynamicznej nie wymaga a priori znajomości czasu trwania procesu. Siatka taka jest przeskalowywana na każdym kroku czasowym próbkowania temperatury. Przeskalowanie polega na zwiększeniu kroku przestrzennego siatki. Uwzględnia się przy tym aktualną wartość współczynnika dyfuzji  $D_A(T)$  i przyrost czasu dyfuzji  $t_{dyf}$ . Dotychczasowe rozwiązanie równania staje się warunkiem początkowym  $u_0(x)$  dla kolejnego etapu dyfuzji. Jest ono przenoszone do węzłów nowej siatki poprzez interpolację liniową. W efekcie z każdym krokiem czasowym procesu zachowywana jest maksymalna efektywna gęstość punktów rozwiązania równania.

Na rysunku 3 pokazane zostało porównanie ewolucji rozwiązania dyfuzji wstępnej dla procesu trwającego 15 minut w chwilach czasu  $t=100s$ ,  $t=200s$  i  $t=900s$  uzyskane na siatce statycznej a) i dynamicznej b). W każdym przypadku ilość węzłów siatki rozwiązania jest taka sama  $n=40$ . W obu

przypadkach przyjęto taki sam hipotetyczny przebieg temperatury procesu  $T(t)$ . Zastosowano też jednakowy czas próbkowania  $t_{dyf}=10s$ . Pokazane symulacje obliczeń wskazują na zaletę stosowania siatki dynamicznej. Zaleta ta będzie się uwiadczała w sposób zdecydowany dla długich procesów dyfuzji. Powiększenie pokazane na rysunku 3b ilustruje zmiany czasowe współczynnika załamania przy powierzchni szkła wynikające z równania (5). Przedstawione symulacje numeryczne odnoszą się do wymiany jonów  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  w szkłe sodowo-wapniowym, dla których stosowane są temperaturowe charakterystyki współczynników dyfuzji (rys.1a i b).



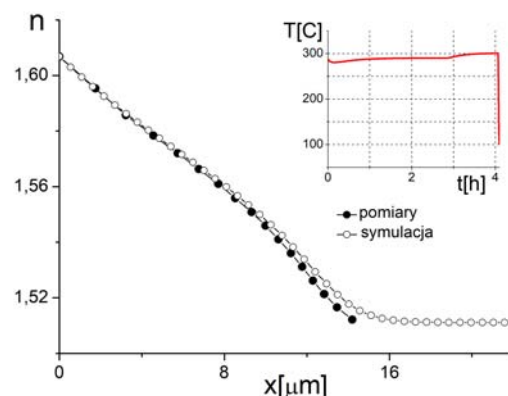
Rys.3. Porównanie ewolucji rozwiązania równania dyfuzji na siatce statycznej a) i dynamicznej b)

### Przykłady zastosowań kontroli procesów wymiany jonów w szkłe sodowo-wapniowym

Zastosowanie opisanego sposobu kontroli procesów dyfuzji wstępnej i wygrzewania przedstawiono na rysunkach 4 i 5. W obu przypadkach wyniki końcowe symulacji numerycznych skonfrontowane zostały z pomiarami profili refrakcyjnych wytworzonych światłowodów planarnych. Zastosowana metoda wyznaczania profili refrakcyjnych bazuje na pomiarach goniometrycznych kątów synchronicznych pobudzanych modów falowodowych z wykorzystaniem sprzęgacza pryzmatycznego [28]. Na ich podstawie obliczane są efektywne współczynniki załamania wszystkich modów. Rekonstrukcja profilu refrakcyjnego polega na przyporządkowaniu modom własnym światłowodu ich punktów zwrotnych na podstawie równania modowego. Wyznaczany tym sposobem profil refrakcyjny jest przybliżeniem dokonywanym w liczbie punktów równej liczbie modów własnych falowodu [28].

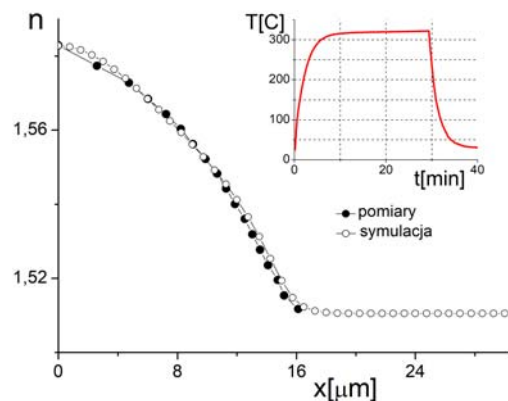
Na rysunku 4 przedstawiono porównanie profilu refrakcyjnego światłowodu wytworzonego w szkłe sodowo-wapniowym wymianą jonów  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  w 4-godzinym procesie dyfuzji. Pokazany przebieg czasowy temperatury

procesu był próbkowany z okresem  $t_{dyf}=10 s$ . W symulacji numerycznej rozwiązywano równanie dyfuzji na siatce dynamicznej z liczbą węzłów  $n=40$ .



Rys.4. Symulacja numeryczna czterogodzinne procesu dyfuzji. Wymiana jonowa  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  w szkłe sodowo-wapniowym

Z kolei na rysunku 5 pokazano wynik symulacji numerycznej 40-minutowego procesu wygrzewania wytworzonego wcześniej światłowodu w procesie 4-godzinnej dyfuzji wstępnej. W tym przypadku warunkiem początkowym w rozwiązywaniu równania dyfuzji był profil refrakcyjny symulacji numerycznej pokazany na rysunku 4. Tak, jak powyżej obliczenia numeryczne przeprowadzone zostały na siatce dynamicznej z liczbą węzłów  $n=40$ . Okres próbkowania temperatury procesu wynosił  $t_{dyf}=10 s$ .



Rys.5. Symulacja numeryczna 40-minutowego procesu wygrzewania. Wymiana jonowa  $Ag^+ \leftrightarrow Na^+$  w szkłe sodowo-wapniowym

### Wnioski

W pracy zaproponowano metodę kontroli procesów wymiany jonowej w szklach polegającą na rozwiązywaniu równania dyfuzji w rzeczywistym czasie trwania procesu technologicznego. Uzyskiwane na bieżąco wyniki umożliwiają pozyskiwanie informacji o tworzących się zmianach refrakcji szkła. Przedstawione rezultaty obliczeń odnoszą się do jednowymiarowych (planarnych) struktur światłowodowych. Bazują one na wyznaczonych charakterystykach temperaturowych współczynników dyfuzji wymienianych jonów. Charakterystyki takie mogą być wyznaczone z dużą precyzją właśnie w odniesieniu do tego typu struktur. Jednak opisana metoda może być również zastosowana w innych dwu- lub trójwymiarowych symulacjach gradientowych zmian refrakcji szkła w rzeczywistym czasie ich tworzenia. Kluczowym problemem będzie tu czas rozwiązania równania dyfuzji. W przypadkach dwu- lub trójwymiarowych może być on istotnie długi. Jednak należy



zdawać sobie sprawę z faktu, że bezwładność termiczna procesów może być również bardzo duża. Można mieć na to wpływ poprzez odpowiedni dobór pojemności ciepłej źródła domieszki. Tak więc czasowe zmiany temperatury podczas realizacji takich procesów mogą być na tyle wolne, że możliwe będzie zastosowanie rozsądnie długich okresów próbkowania  $t_{dyf}$  temperatury zapewniających wykonanie obliczeń. Należy również kierować się optymalnym doborem gęstości siatki węzłów, na której wykonywane są obliczenia. Na każdym kroku czasowym możliwe jest również wykonywanie dodatkowych obliczeń w odniesieniu do aktualnego profilu refrakcyjnego (wyznaczanie efektywnych współczynników załamania prowadzonych modów, kontrola naprężeń w przypadku dwójtomności). Przy zastosowaniu opisanej kontroli procesów wymiany jonów można oczekiwać bardzo dobrej powtarzalności uzyskiwanych wyników.

*Praca zrealizowana w ramach programu TEAM-NET Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, projekt „Hybrydowe platformy czujnikowe zintegrowanych układów fotonicznych na bazie materiałów ceramicznych i polimerowych” (HYPHa), projekt nr POIR.04.04.00-00-14D6/18.*

**Autor:** dr hab. inż. Roman Rogoziński prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Katedra Optoelektroniki, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: roman.rogozinski@polsl.pl

#### LITERATURA

- [1] Garfinkel H. M., Ion-exchange equilibria between glass and molten salts, *J. Phys. Chem.* 72 (1968), 12, 4175-4181
- [2] Doremus R. H., Ion exchange in glass, Chapter 1 in *Ion Exchange A Series of Advances*, (1969) 1-42, Marcel Dekker, New York
- [3] Izawa T., Nakagome H., Optical waveguide formed by electrically induced migration of ions in glass plates, *Appl. Phys. Lett.* 21 (1972) (12), 584-586
- [4] Ramaswamy R.V., Srivastava R., Ion-exchanged glass waveguides: a review, *IEEE J. Lightwave Technol.* LT-6 (1988) (6), 984-1000
- [5] Ross L., Integrated optical components in substrate glasses, *Glastech. Ber.* 62(8) (1989), 285-297
- [6] Najafi S. I., *Introduction to Glass Integrated Optics*, Artech House, Boston, MA (1992)
- [7] Nikonorov N. V., Petrovskii G. T., Ion-exchanged glasses in integrated optics: the current state of research and prospects (a review), *Glass Phys. Chem.* 25(1) (1999), 16-55
- [8] Mazzoldi P., Carturan S., Quaranta A., Sada C., Sglavo V. M., Ion exchange process: History, evolution and applications, *Rivista Del Nuovo Cimento*, Vol. 36, No 9 (2013) 397-459
- [9] Tervonen A., West B. R., Honkanen S., Ion-exchanged glass waveguide technology: a review, *Optical Engineering* 50(7), (2011) 071107
- [10] Honkanen S., et al., Recent advances in ion exchanged glass waveguides and devices, *Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B*, 47 (2), (2006) 110-120
- [11] Mazzoldi P., Sada C., A trip in the history and evolution of ion-exchange process, *Mat. Sci. Eng. B* 149(2), (2008) 112-117
- [12] Giallorenzi T. G., et al. Optical Waveguides Formed by Thermal Migration of Ions in Glass, *Appl. Opt.* 12, (1973) 1240-1245
- [13] Stewart G., Laybourn P., Fabrication of ion-exchanged optical waveguides from dilute silver nitrate melts, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-14(12), (1978) 930-934
- [14] Chludzinski P., Ramaswamy R. V., T. J. Anderson, Ion exchange between soda-lime silica glass and sodium nitrate-silver nitrate molten salts, *Phys. Chem. Glasses* 28(5), (1987) 169-173
- [15] Jackel J. L., Glass waveguides made using low melting point nitrate mixtures, *Appl. Opt.* 27(3), (1988) 472-475
- [16] Chartier G. H., Jaussaud P., A. D. de Oliveira, and O. Parriaux, Optical waveguides fabricated by electric-field controlled ion exchange in glass, *Electron. Lett.* 14(5), (1978) 132-134
- [17] Grelin J., Ghibaudo E., Broquin J.-E., Study of deeply buried waveguides: A way towards 3D integration, *Mat. Sci. Eng.: B* 149(2.), (2008) 185-189
- [18] Viljanen J., Leppihalme M., Fabrication of optical strip waveguides with nearly circular cross section by silver ion migration technique, *J. Appl. Phys.* 51(7), (1980) 3563-3565
- [19] Leminger, O.G., Rothamel, U., Zengerle, R., et al., Characterization of Ion-Exchanged Channel Waveguides in Optical Glasses, *Proc. SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 651 (1986), 51-57
- [20] Lupascu A., et al. Modeling ion exchange in glass with concentration-dependent diffusion coefficients and mobilities, *Opt. Eng.* 35(6), (1996) 1603-1610
- [21] Siew, S.Y., et al. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development. *J. Lightwave Technol.*, 39, (2021) 4374-4389
- [22] Karasiński P., Zięba M., Gondek E., Nizioł J., Gorantla S., Rola K., Bachmatiuk A., Tyszkiewicz C., Sol-Gel Derived Silica-Titania Waveguide Films for Applications in Evanescent Wave Sensors-Comprehensive Study, *Materials*, 15, (2022) 7641
- [23] Karasiński P., Rogoziński R. Characterization and sensor properties of sol-gel SiO<sub>2</sub>:TiO<sub>2</sub> film/ion-exchange glass optical waveguides. *Opt. Commun.* Vol. 281 Iss. 9, (2008) 2472-2480
- [24] Rogoziński R. Producing the gradient changes in glass refraction by the ion exchange method. Selected aspects *Ion exchange - studies and applications*. Ed. Ayben Kilislioglu, InTech, (2015) 105-138
- [25] Rogoziński R. Producibility of the ion-exchange method in manufacturing gradient refractive index in glass, *Bull. Pol. Acad. Sci., Tech. Sci.* Vol. 62 No. 4 (2014) 655-665
- [26] Gato L., Srivastava R., Time Dependent Surface Index Change in Ion Exchanged Waveguides, *Optics Communications*, Vol. 123, No. 4-6, (1996) 483-486
- [27] Crank J., *The Mathematics of Diffusion*. Oxford, U.K.: Clarendon, (1956)
- [28] Rogoziński R., Planarne struktury światłowodowe wytwarzane metodą wymiany jonowej w szklach. Wybrane zagadnienia z technologii wytwarzania, pomiarów właściwości optycznych i modelowania numerycznego struktur, *Monografia*, Gliwice (2007) Wydawnictwo Politechniki Śląskiej nr 135
- [29] Björck Å., Dahlquist G., *Metody numeryczne*, PWN Warszawa (1987)