

## W pełni optyczny przełącznik wykorzystujący jednorodne światłowodowe siatki Bragga

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano koncepcję całkowicie optycznego przełącznika opartego na dwóch jednorodnych światłowodowych siatkach Bragga oraz światłowodach domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich. Przedstawiono model układu wykazującego właściwości bistabilne, warunkujące przełączanie w pełni optyczne. Dokonano również analizy podstawowych właściwości zaproponowanego układu przełącznika optycznego w oparciu o uzyskane charakterystyki przetwarzania.

**Abstract.** In this article the concept of all-optical switch based on two uniform fiber Bragg gratings and rare earth elements doped optical fibers have been presented. A model showing the bistable properties, conditioning all-optical switching have been also submitted. The basic properties of the proposed optical switch based on processing characteristics have been analyzed. The all-optical switch based on two uniform fiber Bragg gratings and rare earth elements doped optical fibers

**Słowa kluczowe:** optyczny przełącznik, światłowodowe siatki Bragga, światłowody domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich.

**Keywords:** all-optical switch, fibre Bragg gratings, rare earth elements doped fibres.

### Wstęp

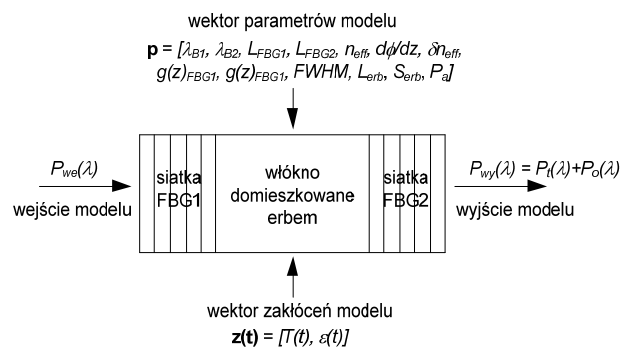
Światłowodowe siatki Bragga są szeroko wykorzystywane zarówno jako czujniki wielkości fizycznych [1-3] oraz jako elementy układów stosowanych w telekomunikacji [4-5]. Wykorzystanie wszystkich możliwości sieci światłowodowych można osiągnąć dopiero po wyeliminowaniu konwersji sygnału optycznego na elektryczny, która ogranicza szerokość pasma. Eliminacja taka jest obecnie możliwa dzięki opracowaniu optycznych przełącznic OXC (ang.: *Optical Crossconnects*) oraz multiplexerów optycznych OADM (ang.: *Optical Add-Drop Multiplexers*) [6]. Zjawisko bistabilności optycznej powstające przy wykorzystaniu pojedynczej siatki Bragga zostało opisane w publikacjach z roku 1995. W pierwszych pracach przedstawiono rozwiązania, w których próg przełączania optycznego występował dla wejściowego sygnału optycznego siatki równego 200 W [7]. W pracach z tego zakresu wykazano, że nieliniowy współczynnik Kerra w zwykłym włóknie krzemowym jest na tyle mały, że zmiana pola modu powodowana nieliniowym efektem Kerra wymaga ok. 200 kW mocy optycznej. Jest to wartość znacznie większa od poziomu mocy przełączania optycznego [8]. Należy wspomnieć, że niektóre inne materiały nieliniowe, np. półprzewodnik GaAs, GsAs-AlAs czy GaAs bazujący na MQW (ang.: *Multiple Quantum Well*) charakteryzują się dużą wartością nieliniowości optycznej w sąsiedztwie pasma zabronionego. Wartości nieliniowych współczynników odpowiadające współczynnikom Kerra są w takich materiałach wystarczająco duże (około  $10^9$  większe niż w przypadku zwykłego włókna krzemowego) aby spowodować zmianę pola modu. Wszystkie współczynniki sprzęgania są wtedy zależne od poziomu mocy wejściowej. Kolejne prace z zakresu badania bistabilności optycznej i przełączania optycznego zmierzały w kierunku opracowania metod pozwalających na zmniejszenie progu przełączania. W roku 2005 zaproponowano układ wykazujący właściwości bistabilne złożony z pojedynczej FBG bazujący na skrośnej modulacji fazy XPM (ang.: *Cross Phase Modulation*) [9]. Próg przełączania wyniósł  $18 \text{ GW/cm}^2$  przy przekroju poprzecznym  $15 \mu\text{m}^2$ . Dla pojedynczej siatki Bragga użytej do przełączania w pełni optycznego osiągnięto już poziom mocy, przy której następuje przełączenie równy 20 W. W celu dalszej redukcji progu, przy którym następuje efekt przełączania optycznego zaproponowano hybrydowe urządzenie wykazujące właściwości bistabilne, bazujące na pojedynczej siatce Bragga. Próg przełączania w tym

przypadku wyniósł 1 mW [10]. Ze względu na wysoką rozdzielczość graniczną rzędu 0.001 nm, powyższe rozwiązanie ma potencjalne zastosowanie w urządzeniach ze sprzężeniem częstotliwościowym lub czujnikach optoelektronicznych.

W niniejszym artykule zaproponowano optyczny układ bistabilny, który wykorzystuje dwie jednorodne siatki Bragga oraz światłowód domieszkowany erbem. W ten sposób uzyskano efekt tzw. nieliniowej wnęki Fabrego-Perota. Zbudowano model takiego urządzenia przy wykorzystaniu metody macierzy przejścia. Pozwala ona na analizę właściwości a w przyszłości również budowę układów bistabilnych, pracujących zarówno w trybie transmisyjnym jak i odbiciowym. Wykazano, dla jakich warunków (przy przekroczeniu pewnej wartości mocy wejściowej) można uzyskać silny efekt nieliniowy, generowany we włóknie domieszkowanym erbem. Obliczenia i zaproponowany model matematyczny posłużyły do zbadania właściwości urządzeń optycznych opartych na FBG, wykazujących własności bistabilne.

### Model matematyczny całkowicie optycznego przełącznika z dwiema siatkami Bragga

Zaproponowano uzyskanie efektu bistabilnej charakterystyki przetwarzania układu poprzez zastosowanie światłowodów o nieliniowym współczynniku załamania światła. W ten sposób uzyskano światłowodową wnękę Fabrego-Perota, przy czym jako włókno zastosowano ośrodek czynny w postaci światłowodu domieszkowanego erbem (rys. 1).



Rys. 1. Schemat modelu układu bistabilnego

Model zbudowany w oparciu o schemat z rysunku 1 pozwala na rozwiązanie propagacji światła przez układ wykazujący właściwości bistabilne. Sygnał wejściowy  $P_{we}(\lambda)$  jest w modelu przetwarzany na sygnał wyjściowy  $P_{wy}(\lambda)$  w postaci zarówno mocy transmitowanej przez układ  $P_t(\lambda)$  jak i mocy odbitej  $P_o(\lambda)$ . Model pozwala na wyznaczenie powyższych wielkości dla różnych wartości parametrów układu złożonego z dwóch siatek Bragga oraz włókna domieszkowanego erbem. Wektor wartości parametrów umożliwia wprowadzenie do modelu wielkości charakterystycznych układu takich jak: długości fali Bragga siatek przełącznika optycznego  $\lambda_{B1}$ ,  $\lambda_{B2}$ , fluktuacja okresu siatki na jej długości  $d\phi/dz$ , funkcje apodyzacyjne siatek  $g(z)_{FBG1}$  i  $g(z)_{FBG2}$ , amplitudy modulacji współczynnika załamania światła w siatkach  $\delta n_{eff}$ , długości siatek  $L_{FBG1}$  i  $L_{FBG2}$ , szerokości połówkowe widma całego układu  $FWHM$ , wielkość pola przekroju włókna aktywnego  $S_{erb}$ , długości włókna erbowego  $L_{erb}$ , oraz mocy zaabsorbowanej we włóknie  $P_a$ . Model skonstruowano w oparciu o teorię modów sprzężonych. Niestety, w przypadku zaproponowanego układu bardzo ciężko jest znaleźć rozwiązanie analityczne równań modów sprzężonych (3) i (4). W artykule zaproponowano metodę numeryczną rozwiązania tych równań stosując algorytmy numeryczne wykorzystujące macierze przejścia całego układu.

Rozkład pola elektrycznego wzdłuż rdzenia światłowodu, na którym umieszczone są dwie siatki Bragga wyraża się zależnością [11]:

$$(1) \quad E(x, y, z) = [A(z)e^{-i\beta z} + B(z)e^{-\beta z}] \cdot e_t(x, y),$$

gdzie:  $A(z)$  – amplituda modu propagującego w kierunku od wejścia modelu do jego wyjścia,  $B(z)$  – amplituda modu propagującego od wyjścia modelu do jego wejścia,  $z$  – oś wzdłuż której zapisane są siatki Bragga (oś światłowodu),  $e_t$  – pole poprzeczne modu,  $\beta$  - stała propagacji, zależna od długości fali  $\lambda$  światła propagującego przez układ, liczona zgodnie z równaniem (2):

$$(2) \quad \beta = 2\pi n_{eff} / \lambda.$$

Równanie pola modu propagującego w kierunku od wejścia do wyjścia układu  $S_{M+}(z)$  oraz modu propagującego w kierunku odwrotnym (od wyjścia do wejścia)  $S_{M-}(z)$  uzyskano wprowadzając do równań modów sprzężonych [12] rozkład pola opisany równaniem (1), co pozwala na uzyskanie równań (3) i (4) w postaci:

$$(3) \quad \frac{dS_{M+}(z; \delta)}{dz} = i\delta(z)S_{M+}(z) + q(z)S_{M-}(z),$$

$$(4) \quad \frac{dS_{M-}(z; \delta)}{dz} = -i\delta(z)S_{M-}(z) + q^*(z)S_{M+}(z),$$

gdzie:  $q$  – tzw. całkowity współczynnik sprzężenia w siatce, określony równaniem:

$$(5) \quad q = i\kappa,$$

$\delta$  jest parametrem rozstrojenia od długości fali Bragga i określona jest zależnością:

$$(6) \quad \delta = \beta - (\pi / \lambda) = \left[ \left( \frac{1}{\lambda} \right) - \left( \frac{1}{\lambda_B} \right) \right] 2\pi n_{eff}.$$

Dodatkowo, każda para  $S_{M+}(z)$  i  $S_{M-}(z)$  rozwiązań równań modów sprzężonych musi spełniać równania (3) i (4) przy warunkach brzegowych określonych równaniami (7) i (8):

$$(7) \quad S_{M+}(0; \delta) = 1,$$

$$(8) \quad S_{M-}(2L_{FBG} + d; \delta) = 0,$$

dla których odbicie całego układu spełnia równanie (9):

$$(9) \quad P_r(\delta) = S_{M-}(0, \delta).$$

Moc transmisyjna układu musi spełniać równanie brzegowe:

$$(10) \quad P_t(\delta) = S_{M+}(2L_{FBG} + L_{erb}; \delta).$$

W celu wyznaczenia spektralnej charakterystyki odbiciowej dokonano podziału siatek przełącznika na połączone ze sobą szeregowo reflektory Bragga o skończonej długości. Dla powyższego przypadku można zapisać macierzowe równanie opisujące sygnał na końcach układu równaniem:

$$(11) \quad \begin{bmatrix} S_{M+}(2L_{FBG} + L_{erb}) \\ S_{M-}(2L_{FBG} + L_{erb}) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} S_{M+}(0) \\ S_{M-}(0) \end{bmatrix},$$

przy czym  $\mathbf{T}$  jest to macierz transmisji układu. Zgodnie z teorią macierzy przejścia macierz propagacji układu opisano równaniem:

$$(12) \quad \mathbf{T}_T = \begin{bmatrix} e^{(i\delta\Delta z)} & 0 \\ 0 & e^{-(i\delta\Delta z)} \end{bmatrix},$$

gdzie  $\Delta z$  oznacza długość poszczególnych sekcji. Natomiast macierz opisującą jeden dyskretny reflektor Bragga dana jest równaniem (13):

$$(13) \quad \mathbf{T}_{DRB} = \begin{bmatrix} 1 & -r_k^* \\ r_k & 1 \end{bmatrix},$$

gdzie  $r_k$  oznacza współczynnik odbicia takiego reflektora, przy czym można go wyrazić zależnością:

$$(14) \quad r_k = \tanh\left(\frac{|q|}{\Delta z}\right) \cdot \frac{q^*}{|q|}.$$

Uwzględniając równania (12), (13) i (14) oraz po uwzględnieniu, że cały układ składa się z dwóch jednorodnych siatek rozdzielonych włóknom aktywnym domieszkowanym erbem równanie macierzowe (11) można zapisać w postaci:

$$(15) \quad \begin{bmatrix} S_{M+}(2L_{FBG} + L_{erb}) \\ S_{M-}(2L_{FBG} + L_{erb}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{(i\delta\Delta z)} & 0 \\ 0 & e^{-(i\delta\Delta z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -r_k^* \\ r_k & 1 \end{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{1-|r_k|^2}} \times \begin{bmatrix} e^{[(\alpha+i\beta)d]} & 0 \\ 0 & e^{[-(\alpha+i\beta)d]} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{(i\delta\Delta z)} & 0 \\ 0 & e^{-(i\delta\Delta z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -r_k^* \\ r_k & 1 \end{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{1-|r_k|^2}} \begin{bmatrix} S_{M+}(0) \\ S_{M-}(0) \end{bmatrix}.$$

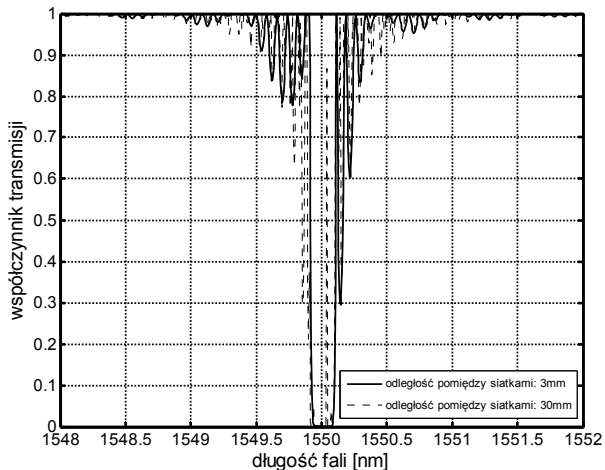
Całkowitą wartość mocy odbitej od układu, zależną od pozycji wzdłuż osi włókna i rozstrojenia można zatem opisać po uwzględnieniu równania (14) w postaci:

$$(16) \quad P_r(z; \delta) = \frac{[q_k + P_r(z + \Delta z; \delta)e^{2i\delta\Delta z}]}{1 + q_k^* P_r(z + \Delta z; \delta)e^{2i\delta\Delta z}}.$$

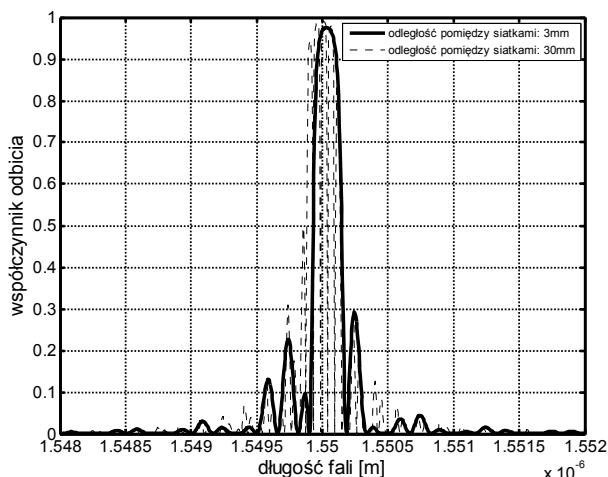
Dodatkowo, współczynnik odbicia całego układu otrzymano przy założeniu, że spełnione jest równanie (17):

$$(17) \quad P_r(2L_{FBG} + L_{erb}) = 0,$$

oraz podstawiając do równania (16)  $z = 0$ , co prowadzi do otrzymania widma w postaci:  $Pr(\delta) = Pr(0; \delta)$ . Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki spektralne transmisyjne uzyskane dla układu złożonego z dwóch siatek Bragga oddalonych od siebie o 3 mm i 30 mm.



Rys.2. Transmisyjne charakterystyki widmowe układu złożonego z dwóch siatek Bragga umieszczonych na tym samym włóknie w różnych odległościach.



Rys.3. Odbiciowe charakterystyki widmowe układu złożonego z dwóch siatek Bragga umieszczonych na tym samym włóknie w różnych odległościach.

Wyniki podane na wykresach 2 i 3 uzyskano dla długości siatek  $L_{FBG1} = L_{BG2} = 5$  mm oraz dla długości fali bragga siatek  $\lambda_{B1} = \lambda_{B2} = 1550$  nm. Jak można zauważyć odległość pomiędzy siatkami wpływa na szerokość charakterystyki transmisyjnej układu. Zwiększenie odległości pomiędzy siatkami powoduje poszerzenie charakterystyki spektralnej, a przy odległości rzędu 30 mm rozszczepienie charakterystyki (widoczne są dwa piki transmisyjne) – rys. 2. Również na rysunku 3 widać efekt rozszerzenia charakterystyki (tym razem odbiciowej) oraz pojawienie się kilku pików odbiciowych. Jest to związane z pojawieniem się efektu Fabrego-Perota, który powstaje wskutek interferencji sygnału pomiędzy dwiema siatkami, działającymi w układzie jak zwierciadła.

Z równania (15) otrzymuje się współczynnik transmisji  $T$  całego układu, który przedstawia się w formie równania (18):

$$(18) \quad T = (1 - R)^2 / \left[ e^{(2\alpha L_{FBG})} - 2R + R^2 e^{(-2\alpha L_{FBG})} + 4R \sin^2(\beta L_{FBG} - (\varphi - \Delta\varphi)) \right],$$

gdzie  $\alpha$  oznacza współczynnik strat we włóknie aktywnym, równy  $0,7 \cdot 10^{-1}$ ,  $R$  jest współczynnikiem odbicia układu,  $\varphi$  jest fazą sygnału propagującego w układzie, którą z kolei można wyrazić równaniem (19):

$$(19) \quad \varphi = 4\pi n_{eff} L_{FBG} / \lambda.$$

W równaniu (18) pojawia się przesunięcie fazy  $\Delta\varphi$  wynikające z obecności włókna aktywnego w układzie. Zaproponowano wyznaczenie skumulowanej wartości przesunięcia fazy dla całego odcinka włókna erbowego  $L_{erb}$  poprzez całkowanie przesunięcia fazowego występującego w każdej jednostkowej długości  $dz$  włókna:

$$(20) \quad \Delta\varphi = \int_0^{L_{erb}} \frac{2\pi \Delta n(z)}{\Delta\lambda} dz.$$

Wielkość  $\Delta n(z)$  jest zmianą współczynnika załamania światła, po załączeniu pompy optycznej. Nieliniową zmianę tego współczynnika można wyrazić równaniem:

$$(21) \quad \Delta n(z) = - \frac{\frac{P_p(z)}{SI_s} \lambda^3 g_2 N_0}{\frac{1 + P_p(z)}{SI_s} 16\pi n_0^2 \tau_{f,2} g_1} g'_{12}(\Delta f),$$

gdzie parametr  $g'_{12}(f)$  wyraża się równaniem (22) [13]:

$$(22) \quad g'_{12}(\Delta f) = \frac{\Delta f_{12}}{\pi \left[ \Delta f_{12}^2 + \left( \frac{\delta f_{12}}{2} \right)^2 \right]},$$

przy czym  $\Delta f_{12} = f - f_{0,12}$  jest parametrem określającym rozstrojenie od częstotliwości  $f_{0,12}$ . Zakładając, że pole przekroju porzecznego światłowodu pompującego  $\sigma_p$  jest związane ze współczynnikiem pompowania zależnością:

$$(23) \quad W_p = \frac{\sigma_p P_p}{S f_p h},$$

możemy wyznaczyć współczynnik transmisji sygnału optycznego propagującego przez światłowód domieszkowany erbem. W równaniu (23)  $P_p$  jest mocą pompy optycznej,  $S$  jest obszarem oświetlanym przez sygnał pompy,  $f_p$  jest częstotliwością sygnału pompy,  $h$  jest stałą Plancka. Pojawiająca się w równaniu (21) wielkość  $I_s$  jest intensywnością nasycenia, którą można określić równaniem (24):

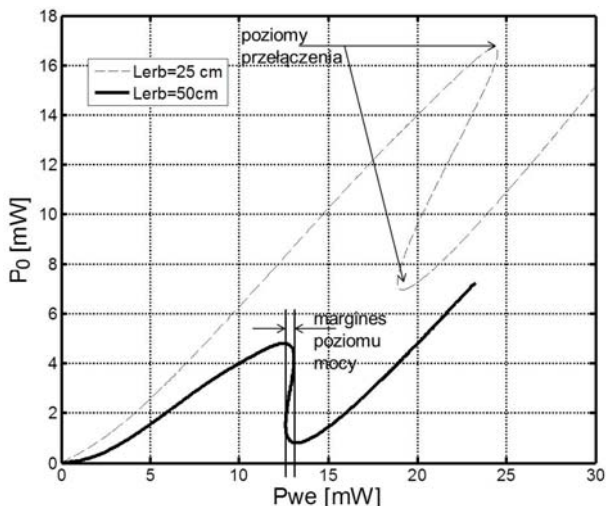
$$(24) \quad I_s = \frac{h f_p}{\left( 1 + \frac{g_1}{g_2} \right) \sigma_p \tau_{f,2}},$$

gdzie  $g_1$  jest to współczynnik degeneracji stanu podstawowego, oznaczany w literaturze również jako  ${}^4I_{15/2}$ ,

$g_2$  oznacza współczynnik degeneracji stanu pompy, oznaczany również jako  $^4I_{13/2}$  [13], przy czym  $g_1=16$ ,  $g_2=14$ .

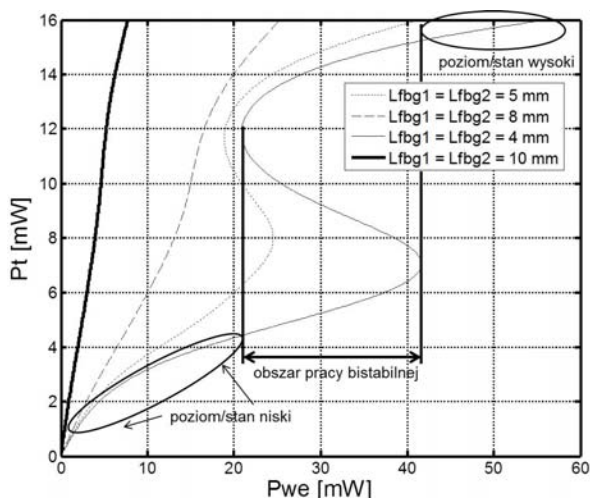
## Wyniki

Zaproponowany układ zbadano pod kątem występowania właściwości bistabilnych. W tym celu wyznaczono charakterystyki przetwarzania zarówno dla trybu odbiciowego (rys. 4) jak i transmisyjnego (rys. 5). Model opisany w poprzednim rozdziale uwzględnia zmianę fazy sygnału propagującego w układzie, spowodowaną obecnością włókna domieszkowanego erbem. Na potrzeby badań numerycznych założono koncentrację jonów erbu ( $Er^{3+}$ ) na poziomie  $1,3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  oraz czas życia jonów na poziomie wzbudzonych równy  $7,95 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ . Na rysunku 4 zestawiono charakterystyki przetwarzania układu pracującego w trybie odbiciowym.



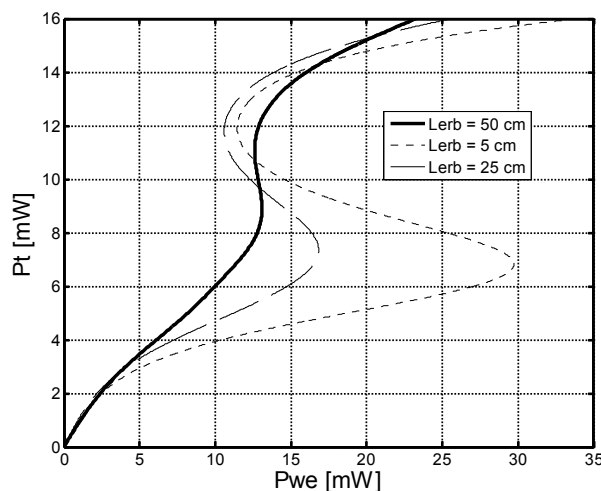
Rys.4. Charakterystyki przetwarzania w trybie odbiciowym dla zmiennych długości włókna erbowego.

Na podstawie zamieszczonych na rysunku 4 charakterystyk przetwarzania widać, że poziom mocy przełączenia zależy od długości włókna domieszkowanego erbem. Przy długości włókna erbowego rzędu 50 cm efekt przełączania zanika, co widać po zmniejszającej się różnicy pomiędzy poziomami mocy wejściowej ( $P_{we}$ ) przed i po przełączeniu. Różnica ta została na rysunku 4 zaznaczona jako margines poziomu mocy.



Rys.5. Charakterystyki przetwarzania układu pracującego w trybie transmisyjnym dla zmiennych długości siatek Bragga.

Analizując rysunek 5 widać wyraźnie, że wraz ze wzrostem długości siatek Bragga układu następuje zmniejszenie mocy przełączania. Z drugiej strony, im krótsze są długości siatek Bragga wykorzystanych w układzie, tym szerszy jest obszar pracy bistabilnej gdyż większa jest wtedy różnica pomiędzy poziomami przełączania do stanu wysokiego i niskiego.



Rys.6. Charakterystyki przetwarzania układu pracującego w trybie transmisyjnym dla zmiennych długości włókna domieszkowanego erbem.

Na charakterystyki przetwarzania zaproponowanego układu wpływa również długość światłowodu domieszkowanego jonami erbu (rys 6). Wartość mocy przełączania można zredukować poprzez wydłużanie odcinka światłowodu aktywnego. Po przekroczeniu długości rzędu 50 cm następuje jednak zanik zjawiska bistabilności.

## Wnioski

Zaprezentowano koncepcję oraz model całkowicie optycznego przełącznika wykorzystującego dwie jednorodne światłowodowe siatki Bragga oraz światłowod domieszkowany jonami erbu. Wykazano dla jakich parametrów układu możliwa jest praca bistabilna układu. Charakterystyki widmowe odbiciowe oraz transmisyjne uzyskano przy wykorzystaniu metody macierzy przejścia, stosowanej najczęściej do układów o periodycznie zmiennych parametrach. Uzyskano w ten sposób model matematyczny układu bistabilnego. Wykazano, że można zredukować poziom mocy przełączania układu do wartości 12,5 mW poprzez zwiększanie długości włókna erbowego charakteryzującego się dużą wartością nieliniowego współczynnika załamania światła. Z drugiej jednak strony po przekroczeniu długości włókna aktywnego powyżej 50 cm następuje zanik zjawiska bistabilności, co widać na przedstawionych charakterystykach przetwarzania układu, zarówno w trybie transmisyjnym jak i odbiciowym. Wykazano silny wpływ długości światłowodowych siatek Bragga na właściwości bistabilności układu. Przy założeniu, że długości siatek są takie same zanik zjawiska bistabilności optycznej następuje już przy wartościach długości siatek rzędu 8 mm. Z drugiej strony zmniejszanie długości siatek poniżej 5 mm wpływa znacząco na wzrost mocy przełączania. Zmiana długości siatek układu z 5 mm do 4 mm powoduje niemal dwukrotny wzrost mocy przełączania (z 24 mW do 42 mW !). Model i koncepcję przełączania bistabilnego opisane w niniejszym artykule ograniczono do przypadku stałej temperatury. Założono stałą temperaturę zarówno w rdzeniu jak i w włóknie wszystkich elementów układu. W praktyce temperatury te

mogą się różnić, co może powodować tzw. przesunięcie termiczne pomiędzy modami propagującymi w układzie. Powyższe problemy będą przedmiotem dalszych badań prowadzonych w tym obszarze tematycznym.

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu „Stypendia naukowe dla doktorantów pracujących w ramach zespołów badawczych”, Program Operacyjny Kapitał Ludzki 2007 - 2013, Priorytet VIII Regionalne kadry gospodarki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz budżetu Województwa Lubelskiego.

#### LITERATURA

- [1] Kisała P., Detection of material defects with indirect method by determining the linear expansion with FBG sensor, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1a (2013), 29-33
- [2] Kisała P., Optoelectronic sensor for simultaneous and independent temperature and elongation measurement using Bragg gratings, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11a (2012), 343-346
- [3] Shen W., Yan R., Xu L., Tang G., Chen X., Application study on FBG sensor applied to hull structural health monitoring, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, (in press) (2015)
- [4] Nazmi A. Mohammed, Taha A. Ali, Moustafa H. Aly, Evaluation and performance enhancement for accurate FBG temperature sensor measurement with different apodization profiles in single and quasi-distributed DWDM systems, *Optics and Lasers in Engineering*, 55 (2014), 22-34
- [5] Nemykin A.V., Shapiro D.A., Optical FBG filter with minimum group delay for WDM systems, *Optics Communications*, 289 (2013), 97-102
- [6] Yuan H., Zhong W.-D, Partially reconfigurable optical add-drop multiplexers for dense WDM networks, *Optics Communications*, 219 (2003) 165-170
- [7] Shi Ch.-X., Optical Bistability in Reflective Fiber Gratings, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31 (1995), 2037-2043
- [8] Krishnamoorthy A. V. Woodward T. K., Novotny R. A. Goossen K. W., J. A. Walker, Ring oscillators with optical and electrical readout based on hybrid GaAs MQW modulators bonded to 0.8  $\mu\text{m}$  silicon VLSI circuits, *Electronics Letters*, 31 (1995), 1917-1918
- [9] Rapp L., Experimental Investigation of Signal Distortions Induced by Cross-Phase Modulation Combined with Dispersion, *IEEE Photonics Technology Letters*, 9 (1977), 1592-1594
- [10] Lv G., Ye H., Li J., Sun X., Zhang X., Hybrid Optical Spectral Bistability in Fiber Michelson Interferometer by Use of a Tunable Fiber Laser, *IEEE Photonics Technology Letters*, 17 (2005), 1061-1063
- [11] Bao, J., Zhang, X., Chen, K. and Zhou, W., Spectra of dual overwritten fiber Bragg grating, *Optics Communications*, 188 (2001), 31-39
- [12] McCall M., On the application of coupled mode theory for modeling fiber bragg gratings, *J. Lightwave Technol.*, 18 (2000), 236-242
- [13] Pantell, R. H., Puthoff, H. E., Fundamentals of Quantum Electronics, New York, *Wiley*, (1969)

---

**Autorzy:** dr hab. inż. Piotr Kisała, Politechnika Lubelska, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: [p.kisala@pollub.pl](mailto:p.kisala@pollub.pl); mgr inż. Jacek Klimek, Instytut Informatyki, ul. Nadbystrzycka 36b, 20-618 Lublin, E-mail: [j.klimek@pollub.pl](mailto:j.klimek@pollub.pl); mgr inż. Krzysztof Skorupski, Instytut Informatyki, ul. Nadbystrzycka 36b, 20-618 Lublin, E-mail: [k.skorupski@pollub.pl](mailto:k.skorupski@pollub.pl).