

Renata SULIMA

MODELOWANIE OPTYCZNEGO ELEMENTU PRZEŁĄCZNICZY OXC OPARTEGO NA KĄTOWYM NAPĘDZIE ELEKTROSTATYCZNYM MEMS

STRESZCZENIE *Przełączniki optyczne MEMS wypierają dotychczasowe przełączniki elektroniczne. Niniejszy artykuł przedstawia rozwiązanie konstrukcyjne do wykorzystania w sterowaniu mikrolusterkami w sieciach światłowodowych. Zaprojektowany układ napędowy charakteryzuje się dużymi kątami wychylenia elementu czynnego, co zapewnia szerokie stosowanie. Konstrukcja opiera się o elektrostatyczny aktuator grzebieniowy o ruchu wahadłowym.*

Słowa kluczowe: MEMS, przełączniki optyczne, napędy grzebieniowe, mikrolusterka

1. WSTĘP

Mikrolusterka MEMS przyciągają w ostatnich latach znaczną uwagę nie tylko środowiska naukowego, ale również komercyjnego, ponieważ stały się nadzieją na rozwiązanie problemu przezroczystych sieci światłowodowych.

mgr inż. Renata SULIMA
e-mail: r.sulima@iel.waw.pl

Zakład Maszyn Elektrycznych
Instytut Elektrotechniki

Nowoczesne przełączniki optyczne stosowane w tych sieciach oparte są na mikrostrukturach MEMS [3], jednak nie tylko sieci światłowodowe wykorzystują mikroukłady z lusterkami, inną dziedziną są też wyświetlacze i projektory [4]. Mikrolusterka są także szeroko stosowane także w systemach interferometrycznych [1], optycznej spektroskopii [2], korekcji odchyłeń [5] oraz obrazowaniu biomedycznym [8]. Mikrostruktury elektromechaniczne produkowane są w procesach podobnych do tych, jakie stosuje się przy produkcji układów scalonych (IC), a jest to mikroobróbka powierzchniowa w połączeniu z mikroobróbką objętościową. Cechy, jakich oczekuje się od większości mikroluster stosowanych w różnych urządzeniach to: równa powierzchnia (płaskość), gładkość i duża zdolność odbijania wiązki promieni.

Najciekawszym i chyba najbardziej rokującym nadzieje na dalszy rozwój jest zastosowanie mikrostruktur z lusterkami w sieciach światłowodowych, ponieważ mamy teraz dobę szybkiego rozwoju technik informacyjnych. Pociąga to za sobą znaczne zwiększenie ilości przepływających informacji przez dostępne sieci oraz szybkości przesyłu. W obecnych gęstych sieciach DWDM mikrostruktury z lusterkami znajdują coraz szersze zastosowania, ponieważ sieci te zawierają selektywne przełączniki oraz rekonfigurowane multipleksery optyczne.

DWDM jest nową technologią przesyłu informacji w sieciach światłowodowych, jej nazwa pochodzi od angielskiego skrótu (Dense Wavelength Division Multiplexing) i oznacza technologię falowego zwielokrotniania przepływności światłowodu przez równoległą, równoczesną i niezależną transmisję wielu promieni optycznych o różnych długościach fal prowadzonych w jednym włóknie światłowodowym.

Osiągnięcie zamierzonego celu tzn. całkowicie przezroczystych sieci optycznych wydaje się realne poprzez zastosowanie przełączników optycznych, w których czas przełączania wynosi ok. 5 ms w zależności od rodzaju sieci, na przykład w sieciach fonicznych z przełączaniem pakietów czas ten jest znacznie mniejszy i wynosi ok. 1 ms. Jednak to nie są wszystkie wymagania, jakie powinna spełniać nowoczesna sieć optyczna; poza czasami przełączania duże znaczenie mają także niezależność polaryzacyjna, małe przesłuchy, małe straty, odpowiedni poziom wzmocnienia, niezależność od długości fali (w zakresie pracy wzmacniacza EDFA), praca wielofalowa, przezroczystość względem szybkości transmisji (do $\sim 10 \div 40$ Gb/s), szybkie przełączanie, prostota obsługi i zastosowania oraz dobra skalowalność. Aby zapewnić te wszystkie wymagania musiały powstać nowej klasy przełączniki, rozwiązań jest wiele i każde z nich ma swoje zalety a także i wady.

2. BUDOWA MIKROAKTURATORA GRZEBIENIOWEGO

Zaprojektowana struktura mikroaktuatora grzebieniowego wykorzystuje efekt „wciągania” ruchomej elektrody uzębionej pod wpływem wytworzonego w obszarze działania elektrod pola elektrycznego. Opracowany model obwodowy struktury grzebieniowej został porównany z modelem połowym obliczonym przy użyciu oprogramowania OPERA 3D.

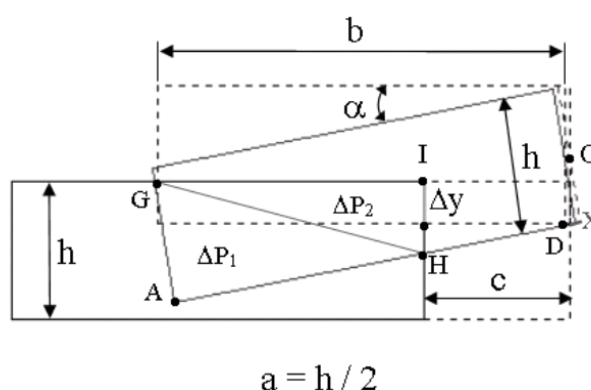
Budowa modelu obwodowego

1) Obliczenie podstawowych pojemności układu

Podstawową pojemnością jest pojemność kondensatora płaskiego powietrznego utworzonego przez czynną część współpracujących ze sobą elektrod. Pojemność główna zależy przede wszystkim od pola powierzchni czynnej elektrod. Ponieważ nie zakłada się przesunięć bocznych grzebieni względem siebie, to pojemność nie zależy od odległości pomiędzy elektrodami. Aby wyznaczyć maksymalną powierzchnię czynną należy skorzystać z zależności określającej maksymalny kąt obrotu elektrody ruchomej, którą przedstawia poniższe równanie:

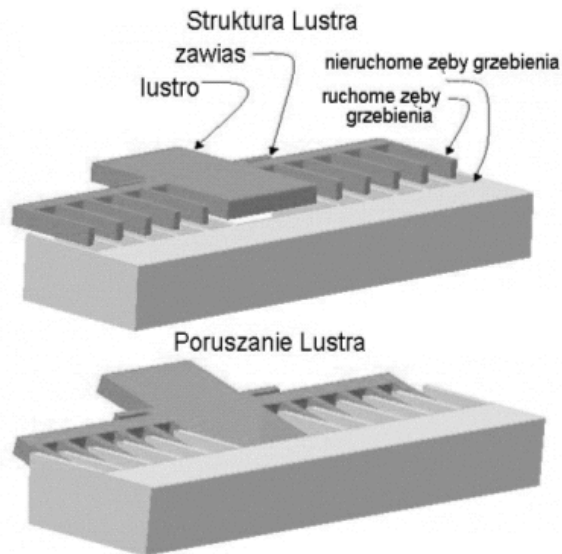
$$\alpha_{\max} = \frac{h}{(b - c) + c} \quad (1)$$

Na rysunku 1 przedstawione zostały podstawowe wymiary rozpatrywanego układu aktuatora grzebieniowego. Cała analiza przeprowadzona została w oparciu o numeryczny model matematyczny opisujący położenie wszystkich punktów i wymiarów grzebienia w zależności od kąta obrotu elektrody ruchomej. Przedstawiony model jest bardzo czytelny i prosty do wyprowadzenia w przeciwieństwie do modelu liniowego [9].

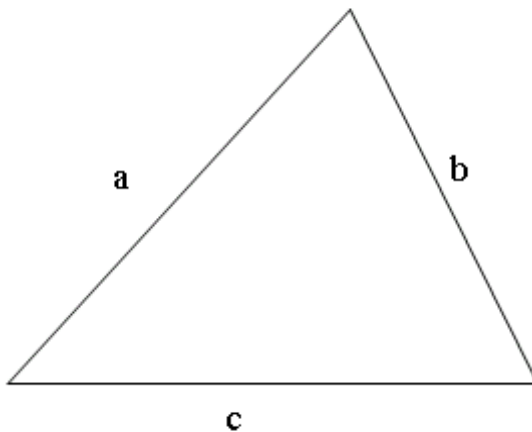


Rys. 1. Rysunek schematyczny przedstawiający wymiary i poszczególne elementy układu STEC

Analizowany układ jest podobny do struktury na rys. 2. Różnica polega na tym, że jest on symetryczny, czyli ma elektrody napędowe po obu stronach zawieszenia; taka konstrukcja umożliwia osiągnięcie dwa razy większych kątów obrotu ($\pm \alpha$), co poszerza znacznie zakres zastosowań tego typu napędów.



Rys. 2. Mikroaktuator grzebieniowy o ruchu kątowym



Rys. 3. Schematyczny element, na którym opiera się obliczenie powierzchni czynnej elektrod

Wyrażenie na pojemność kondensatora płaskiego, z którego oblicza się pojemność podstawową układu:

$$C_1 = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad (2)$$

Do obliczenia pola powierzchni czynnej elektrod wykorzystano elementarne pola składowe, pola trójkątów z zależności:

$$S_{\Delta} = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (3)$$

gdzie:

$$p = \frac{a+b+c}{2} \text{ określa współczynnik wykorzystujący długości boków trójkąta.}$$

Obliczanie współrzędnych punktów charakterystycznych układu:

Dla punktu A (rys. 1):

Współrzędna x

$$a_1 = A_x - O_x \quad (4)$$

Współrzędna y

$$a_2 = A_y - O_y \quad (5)$$

Otrzymujemy

$$\overline{OA} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (6)$$

Współrzędne punktów wektora \overline{OA} obrócone o kąt α obliczane są na podstawie układu równań jak poniżej:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{C} \quad (7)$$

Wyznaczając X z powyższego równania otrzymujemy szukane współrzędne

$$\mathbf{X} = \mathbf{AC}^{-1} \quad (8)$$

gdzie:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a_2 & a_1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix} \text{ natomiast } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} OA^2 \sin(\alpha) \\ OA^2 \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

Wektor X zawiera nowe wartości współrzędnych punktu a obróconego o kąt α . Aby wyznaczyć pole powierzchni czynnej elektrody należy znaleźć punkty przecięcia współpracujących elektrod rozwiązując poniższe równania.

$$x_1 = \left(\frac{x_A - x_B}{y_A - y_B} (y - y_A) \right) + x_A \quad (9)$$

gdzie y jest wartością stałą jest to wysokość elektrody.

$$y_2 = \left(\frac{y_A - y_B}{x_A - x_B} (x - x_A) \right) + y_A \quad (10)$$

gdzie x jest stałą długością elektrody statora.

Wzór na długość boku trójkąta:

$$a = \sqrt{(x_A - x_1)^2 + (y_A - y)^2} 10^{-6} \text{ podobnie dla pozostałych boków trójkąta.} \quad (11)$$

Podobnie oblicza się pozostałe boki trójkąta. Po wyznaczeniu wszystkich długości pole czynne oblicza się ze wzoru (3), a następnie pojemność ze wzoru (2). Aby określić energię i moment elektrostatyczny obliczono numerycznie gradient powierzchni pola.

$$r = \frac{S_{\Delta k} - S_{\Delta}}{k} \quad (12)$$

gdzie:

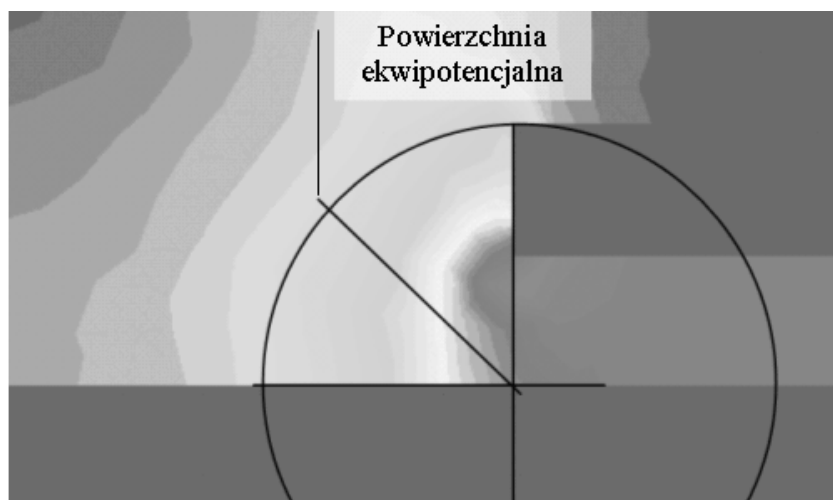
k – elementarna zmiana powierzchni elektrody.

Stąd moment elektrostatyczny jest dany zależnością:

$$M_e = \frac{U^2 \varepsilon}{2d} r \quad (13)$$

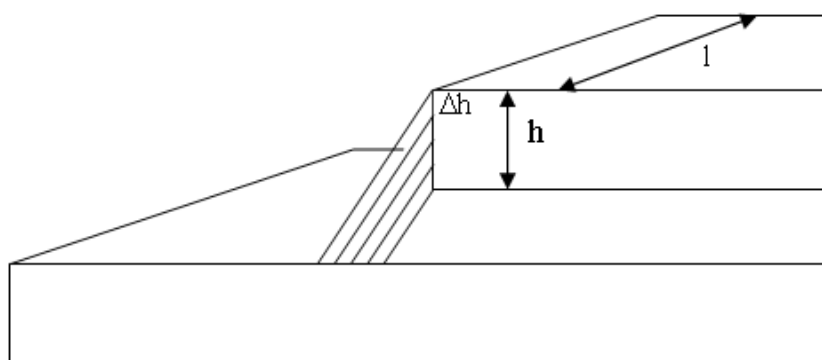
2) Obliczenie pojemności dodatkowych układu

Jedną z podstawowych pojemności dodatkowych jest pojemność rozproszenia na krawędziach pola czynnego elektrod współpracujących. Pojemność ta zależy od długości czynnej współpracujących ze sobą elektrod oraz od odległości pomiędzy nimi. Sytuacja ta jest przedstawiona na rys. 4.



Rys. 4. Przebieg hipotetycznej powierzchni ekwipotencjalnej

1) Obliczenia wykonywano z założeniem równomierności rozkładu pola w szczelinie (kondensator płaski z elektrodami pod kątem 90 stopni i oddalonych od siebie o szerokość szczeliny d). W praktyce przybliża się kolejne wyniki dzieląc elektrody na elementarne odcinki, które można przyjąć za równoległe.



Rys. 5. Ilustracja metody przybliżania kolejnych obliczeń pojemności rozproszenia

$$C = \frac{\varepsilon l \Delta h}{\sqrt{2 \Delta h^2}} \quad (14)$$

gdzie

l – długość elektrody,
 Δh – elementarna grubość elektrody.

2) Obliczenia wykonane w oparciu o wzór całkowy, w którym zakładamy równomierność rozkładu pola w szczelinie pomiędzy krawędziami prostopadłych względem siebie elektrod. Przyjęta do obliczeń powierzchnia jest w przybliżeniu fragmentem walca o promieniu równym $(h+d)$ (grubość elektrody plus szczelina pomiędzy elektrodami) i długości równej l_e . Powierzchnia ekwipotencjalna pokazana na rys. 4 jest w przybliżeniu powierzchnią prostokąta o bokach $(h+d) \times l_e$ wobec tego ładunek gromadzony pomiędzy elektrodami można zapisać jak poniżej:

$$q = \int \varepsilon E dS \quad \text{gdzie} \quad S = (h+d)l_e = r l_e \quad (15)$$

Rozwiązując równanie całkowe na ładunek gromadzony w kondensatorze otrzymujemy:

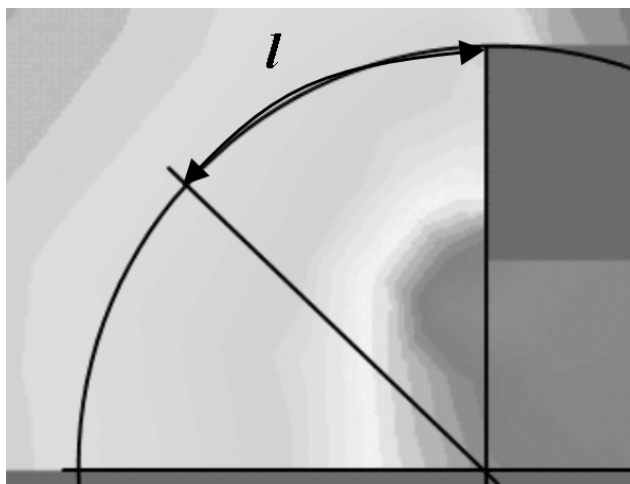
$$q = \int \varepsilon E dS = \int \varepsilon E d(h+d)l_e = \int \varepsilon E l_e dr = \varepsilon E l_e r \quad (16)$$

Stąd możemy obliczyć natężenie pola E , które wynosi:

$$E = \frac{q}{\varepsilon l_e r} \quad (17)$$

Natomiast różnica potencjałów pomiędzy elektrodami przedstawić można zależnością:

$$V = \int E dl \quad (18)$$



Rys. 6. Droga, jaką przebywa ładunek przemieszczając się z jednej elektrody na drugą

Gdzie $l = \frac{1}{8} 2\pi r$ jest ósmą częścią przekroju poprzecznego hipotetycznego walca utworzonego na krawędziach elektrod rys. 4. Droga, jaką musi pokonać ładunek przemieszczając się z jednej elektrody na drugą jest, więc równa długości fragmentu okręgu o zmiennym promieniu r od 0 do $(h+d)$. Wzór na różnicę potencjałów z uwzględnieniem zmiany długości drogi, jaką pokonuje ładunek będzie przedstawiał się jako:

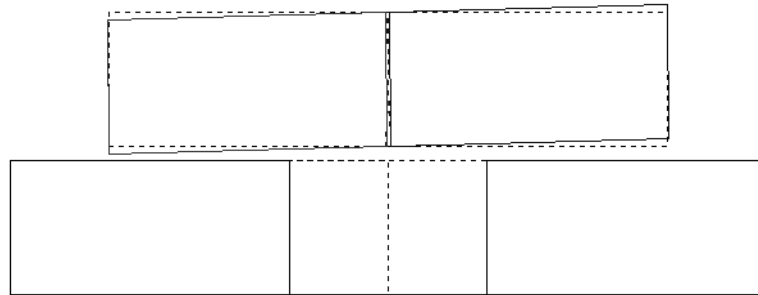
$$V = \int E dl = \int E \frac{1}{4} \pi dr = \frac{1}{4} \pi \int E dr \quad (19)$$

Podstawiając zależność na natężenie pola elektrycznego otrzymujemy:

$$V = \frac{1}{4} \pi \int E dr = \frac{1}{4} \pi \int \frac{q}{\epsilon l_e r} dr = \frac{1}{4} \pi \frac{q}{\epsilon l_e} \int \frac{dr}{r} = \frac{\pi q}{4 \epsilon l_e} \ln \left(\frac{e+d}{d} \right) \quad (20)$$

Stąd pojemność rozproszenia pomiędzy elektrodami (w przypadku grzebienia) wynosi:

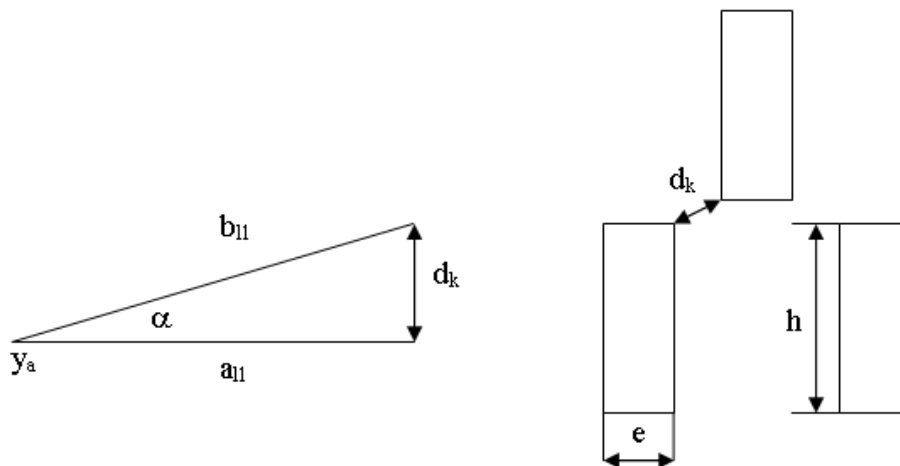
$$C_{r1} = \frac{q}{V} = \frac{q}{\frac{\ln \left(\frac{d+e}{d} \right) \pi q}{4 \epsilon l_e}} = q \frac{4 \epsilon l_e}{\ln \left(\frac{d+e}{d} \right) \pi q} = \frac{4 \epsilon}{\pi \ln \left(\frac{d+e}{d} \right)} l_e(\alpha) \quad (21)$$



Rys. 7. Sytuacja ilustrująca pojawienie się dodatkowej pojemności rozproszenia

Dodatkowa pojemność rozproszenia znajduje się przy krawędziach zbliżających się podczas ruchu elektrod. Jest ona trudna do określenia z powodu tego, że nie jest to pojemność bezpośrednia. W tym przypadku przyjęte zostało uproszczenie, że elektrody są naprzeciwległe i pojemność liczona jest jak dla kondensatora płaskiego ze zmienną odległością elektrod.

Obliczenie pojemności na krawędziach elektrod.



Rys. 8. Oznaczenia zastosowane we wzorach

Odległość pomiędzy elektrodami:

$$d_k = \tan \alpha \cdot a_{11} \quad (22)$$

Elementarna odległość między elektrodami:

$$\Delta d_k = \tan \alpha \cdot \frac{a_{l1}}{n} \quad (23)$$

Długość drugiej krawędzi elektrody:

$$b_{l1} = \sqrt{(\Delta d_k)^2 + \left(\frac{a_{l1}}{n}\right)^2} \quad (24)$$

Powierzchnia czynna elektrod:

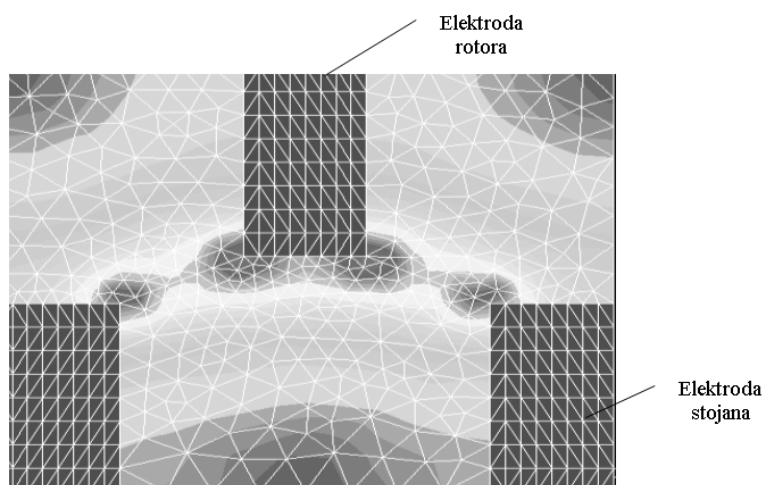
$$S_k = \frac{e}{4} b_{l1}(\alpha) \quad (25)$$

Elementarna pojemność rozproszenia:

$$\Delta C_k = \frac{\varepsilon \cdot e}{4} \frac{\Delta b_{l1}}{\Delta d_k + (y_a - h)} \quad (26)$$

Całkowita pojemność rozproszenia:

$$C_k = \sum_{j=1}^n C_{kj} \quad (27)$$



Rys. 9. Rozkład pola w szczelinie utworzonej przez poruszające się elektrody

Całkowita pojemność układu:

$$C_{\text{tot}} = C_1 + C_{r1} + C_k \quad (28)$$

Siła elektrostatyczna:

$$F_{\text{tot}} = \frac{U^2 \varepsilon}{2d} r + \frac{4U^2 \varepsilon}{2\pi \log\left(\frac{d+e}{d}\right)} r_l + \frac{U^2}{2} r_{C_k} \quad (29)$$

Energia układu elektrostatycznego:

$$E_{\text{tot}} = \frac{U^2}{2} C_{\text{tot}} \quad (30)$$

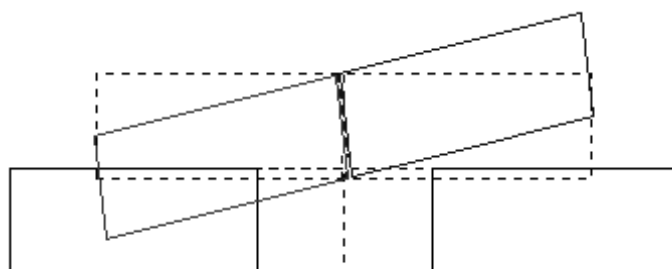
3. WYNIKI

Przeprowadzono obliczenia porównawcze dla trzech składowych całkowitej pojemności układu elektrod mikroaktuatora elektrostatycznego w kilku położeniach. Wyniki obliczeń przedstawione zostały w tab. 1.

TABELA 1

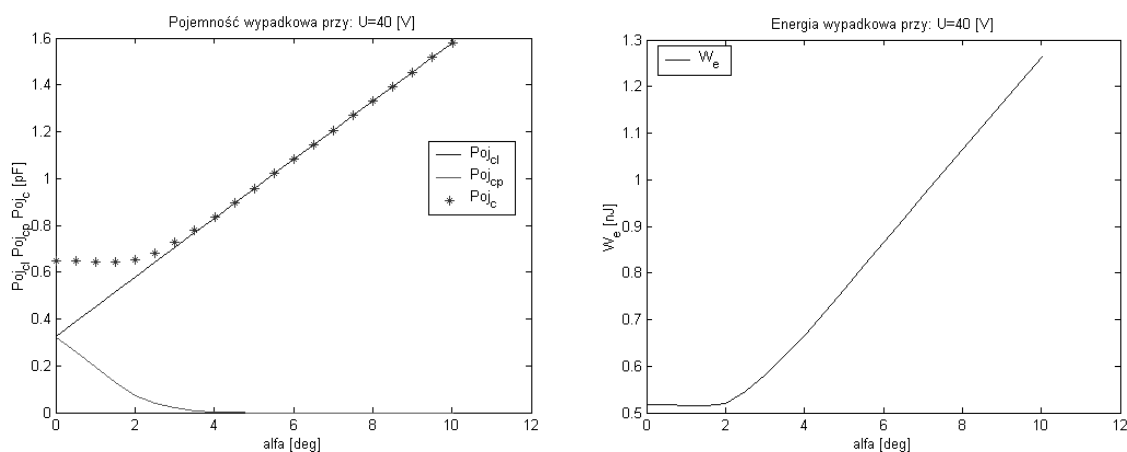
Zestawienie wyników obliczeń pojemności całkowitej układu oraz jego energii elektrostatycznej w funkcji trzech składowych pojemności

Lp		% C	Pojemność główna C_l		Pojemność rozproszenia C_{r1}		Pojemność rozproszenia C_k	
			C [pF]	We [nJ]	C [pF]	We [nJ]	C [pF]	We [nJ]
1	75, 10	88	1.2593	1.0075	2.3727	1.8981	2.3752	1.9001
2	70, 10	73	1.5785	1.2628	2.7399	2.192	2.7428	2.1942
3	65, 10	63	1.9002	1.5202	3.1098	2.4878	3.1132	2.4905
4	60, 10	67	2.2628	1.8102	3.7821	3.0257	3.7862	3.029
5	55, 10	67.8	2.7111	2.1689	4.5513	3.641	4.5565	3.6452

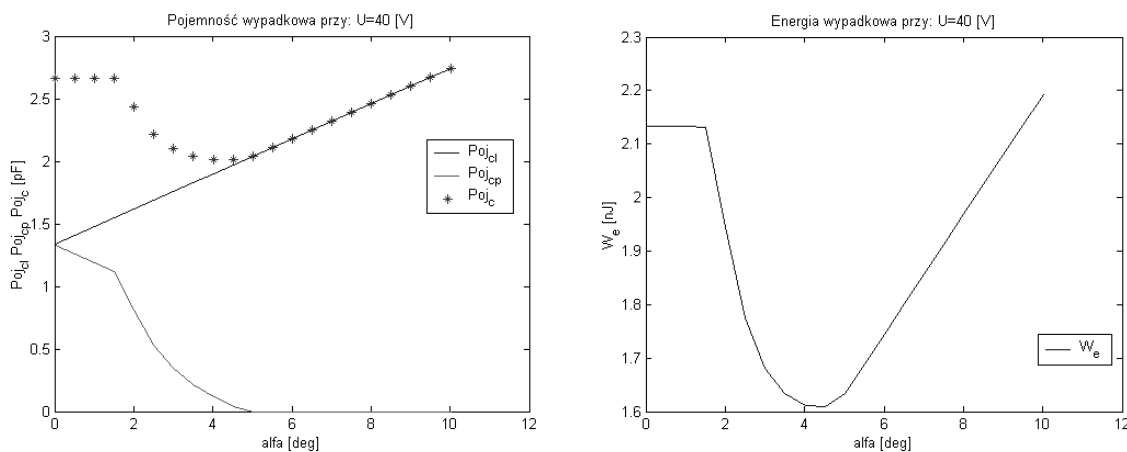


Rys. 10. Położenie wzajemne elektrod dla przypadku obliczeniowego

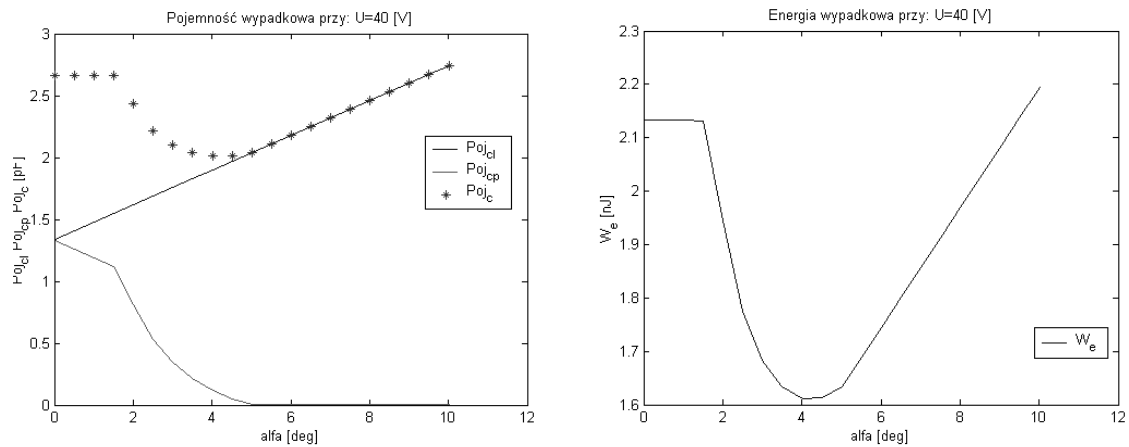
Poniższe rysunki przedstawiają wybrany wariant obliczeń (położenie elektrod ruchomych $O_y = 70$ oraz kąt obrotu $\alpha = 10^\circ$).



Rys. 11. Wynik obliczeń pojemności i energii układu z uwzględnieniem tylko składowej głównej C_1



Rys. 12. Wynik obliczeń C i W_e układu z uwzględnieniem składowej głównej C_1 i składowej C_{11}



Rys. 13. Wynik obliczeń C i W_e układu z uwzględnieniem wszystkich składowych C_1 i C_{r1} i C_k

W tego typu układach bardzo znaczącą rolę odgrywają pojemności rozproszone, które niekiedy w obliczeniach pomija się, ponieważ są problematyczne do wyznaczenia.

Po wykonaniu obliczeń okazało się, że w niektórych położeniach pojemności te są podstawową składową wypadkowej pojemności układu grzebieniowego i wynoszą nawet do 88 % tej pojemności, więc błędem dosyć znacznym jest ich pomijanie.

4. WNIOSKI

Zaprojektowana struktura aktuatora do napędu mikrolusterek skanujących stosowanych jako elementy przełączające w przezroczystych sieciach światłowodowych zapewnia duże kąty przełączania ok. 15° . Jest to struktura symetryczna, więc sumaryczny kąt wychylenia elementu roboczego może wynosić przy ustaleniu odpowiednich wymiarów elektrod sterujących nawet do ponad 25° , co zapewnia duże możliwości przełączania sygnału optycznego. Jednak bezpieczniej sterować ten napęd na poziomie $\pm 10^\circ$.

Proponowany model przełącznika może być wykorzystywany w architekturach 3D. Przełącznik ten poprzez odpowiednie sterowanie napięciowe umożliwia pozycjonowanie lusterek pod różnymi kątami. Jednak, aby napęd taki mógł zaistnieć trzeba spełnić kilka podstawowych wymogów. W tak małych urządzeniach, jak mikroprzełączniki (są to wymiary rzędu dziesiątek lub setek μm) bardzo ważna jest odpowiednia konstrukcja, ponieważ na tym poziomie prawie

niemożliwy jest montaż części. Jeśli już wykorzystuje się montaż to sporadycznie gdyż jest to proces drogi i czasochłonny. Mikronapęd musi być zaprojektowany tak, aby można go było wykonać metodami mikroobróbki, czyli odpowiednio skomponowanymi różnymi metodami wytrawiania w krzemie.

Proponowany napęd jest zasilany niskim napięciem roboczym na poziomie 40 V napędzając całą strukturę mikroprzełącznika.

LITERATURA

1. F. A. Chollet, G. M. Hegde, A. K. Asundi, A. Aiqun Liu: "Simple Extrashort External –Cavity Laser Self-Mixing Interferometer for Acceleration Sensing" Proc. SPIE –The Int. Society for Optical Engineering, vol. 4596, 2001, pp. 272-279.
2. K. J. Kearney , Z. Ninkov : "Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy" Proc. SPIE –The Int. Society for Optical Engineering, vol. 3292, 1998, pp. 81-92.
3. L. Fan , S. Gloeckner, P. D. Dobbelaere, S. Patra, e.a. : "Digital MEMS Switch For Planar Photonic Crossconnects" OFC 2002 pp. 93-94.
4. L. J. Hornbeck, „Deformable-mirror spatial light modulators”, Spatial Light Modulators and Applications III, SPIE Critical Reviews, vol. 1150, Aug 1989, pp 86-102.
5. P. Himiner, D. Dickensheets: „ High speed, large deflection deformable mirrors for focus and spherical aberration control” Proc. 2002 IEEE/LEOS Int. Conference on optical MEMS (cat. No. 02EX610), 2002, pp. 193-194.
6. P. R. Patterson, D. Hah e.a: "An angular vertical comb drive actuator for scanning micromirrors", MOEMS 2001.
7. R. A. Conant, J. T. Nee, K. Y. Lau, R. S. Muller: "A Flat High-Frequency Scanning Micromirror". Technical Digest 2000 Solid-State Sensor & Actuator Workshop, Hilton Head, SC, pp 6 – 9
8. U. Hofmann, S. Muehlmann, m. Witt e.a : „Electrostatically driven micromirrors for a miniturized confocal laser scanning microscope“ Proc. SPIE –The Int. Society for Optical Engineering, vol. 3878, 1999, pp. 29-38.
9. R.Sulima: „Modeling Electrostatic Microactuators Used for Driving Scanning Mirrors” international conference "Mechatronics, Robotics and Biomechanics" Trest 2005, Engineering mechanics vol. 12, no A1, pp. 301-309

Rękopis dostarczono, dnia 27.02.2007 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk

MODELING THE OPTICAL ELEMENT
OF THE OXC SWITCH BASED,
ON ANGULAR ELECTROSTATIC DRIVE

Renata SULIMA

ABSTRACT: *Optical MEMS switches supplant the up to now used electronic switches. The present paper presents designs for control using MEMS in waveguide nets. The drive system show here is featured by big deflection angles of the active element which ensures wide application. The design is based on an electrostatic comb-drive aktuator with perpendicular moment. The comb-drive provides high amounts of energy thus high driving torques sufficient to move the scanning mirror.*