

## Polowa wyrzutnia elektronów dla miniaturowych urządzeń typu MEMS

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono konstrukcję i technologię miniaturowego polowego źródła elektronów kompatybilnego z mikrosystemami MEMS (Micro-Electro-Mechanical System). Źródło składa się z katody polowej z warstwą nanorurek węglowych, elektrody ekstrakcyjnej w postaci siatki oraz krzemowej anody, przedzielonych szklanymi dystansownikami. Zaprezentowano charakterystyki prądowo-napięciowe wykonanych wyrzutni oraz określono wpływ geometrii elektrody ekstrakcyjnej na ich pracę. Uzyskano wysoki prąd emisji polowej 200  $\mu\text{A}$  ( $U < 1000\text{ V}$ ) oraz współczynnik transmisji elektronów przez siatkę sięgający 70%.

**Abstract.** In the article construction and technology of a miniature field-emission electron source compatible with MEMS-type microsystems are described. The electron source is formed as a silicon-glass sandwich and consists of carbon nanotube cathode, mesh extraction electrode and silicon anode, all separated by glass spacers. Influence of extraction electrode geometry on the emission characteristics of the device is presented. Emission current reaches 200  $\mu\text{A}$  ( $U < 1000\text{ V}$ ) and transmission ratio of electrons passing through the gate electrode can be as high as 70%. **Field-emission electron source for miniature MEMS-type devices.**

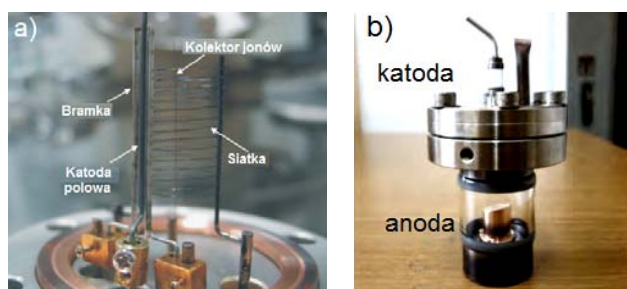
**Słowa kluczowe:** polowa wyrzutnia elektronów, elektroda ekstrakcyjna, MEMS, obudowa próżniowa.

**Keywords:** field-emission electron source, extraction electrode, MEMS, vacuum package.

### Wstęp

Mikro- i nanoostrzowe polowe źródła elektronów znajdują zastosowanie w nowoczesnych urządzeniach próżniowych np.: w płaskich wyświetlaczach FED (Field Emission Displays) [1], detektorach promieniowania [2], lampach mikrofalowych [3], przełącznikach mocy [4], jonizacyjnych czujnikach ciśnienia [5] oraz miniaturowych źródłach promieniowania rentgenowskiego [6].

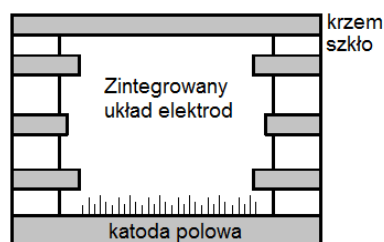
Podstawową wadą wymienionych urządzeń jest brak spójności technologicznej pomiędzy miniaturowym źródłem elektronów a pozostałymi elementami systemu, zwłaszcza obudową. Miniaturowe polowe źródła elektronów wykonywane są najczęściej technikami mikroinżynieryjnymi, a szklane, metalowe lub ceramiczne obudowy – w dalszym ciągu klasycznymi technikami mechanicznymi (rys. 1). Zastosowanie niekompatybilnych technik wytwarzania uniemożliwia pełną miniaturyzację urządzeń i generuje istotne problemy w procesie produkcji.



Rys. 1. Wybrane miniaturowe urządzenia z katodą polową wykonane z zastosowaniem klasycznych technik mechanicznych: a) jonizacyjny czujnik ciśnienia [5], b) mikrolampa rentgenowska [6]

W ostatnich latach rozwijany jest tzw. zintegrowany proces wytwarzania miniaturowych urządzeń próżniowych, w którym źródło elektronów i obudowa wykonywane są w tej samej technologii. Wykorzystuje się przy tym technikę warstwy poświęcanej, a uszczelnienie odpompowanej wewnętrznej mikroobjętości odbywa się przez naniesienie cienkiej warstwy metalicznej w warunkach próżniowych. Dotychczas metoda ta była stosowana jedynie dla źródeł o konfiguracji 2- i 3-elektrodowej [7, 8]. Dla systemów wieloelektrodowych, w których wymagane jest precyzyjne sterowanie wiązką elektronów, nie istnieje spójna technicznie metoda wytwarzania. Blokują to miniaturyzację takich urządzeń jak mikroskopy elektronowe [9], lasery na swobodnych elektronach [10], czy spektrometry mas [11].

W pracy przedstawiono koncepcję konstrukcji nowego typu źródła elektronów zintegrowanego z obudową (rys. 2). Stanowi je wielowarstwowa struktura krzemowo-szklana wykonana z wykorzystaniem technik mikroinżynieryjnych (MEMS). Katodę polową źródła elektronów tworzy cienka warstwa nanorurek węglowych naniesiona na płaskie podłoże krzemowe. Do sterowania wiązką elektronów służy układ kilku elektrod, a ich konfiguracja zależy od doboru odpowiednich podłoży krzemowych i szklanych oraz od wzoru masek zastosowanych w procesie fotolitografii i trawienia. Wszystkie elementy źródła elektronów są ze sobą szczerlnie połączone metodą bondingu anodowego.



Rys. 2. Schemat konstrukcji zintegrowanego źródła elektronów

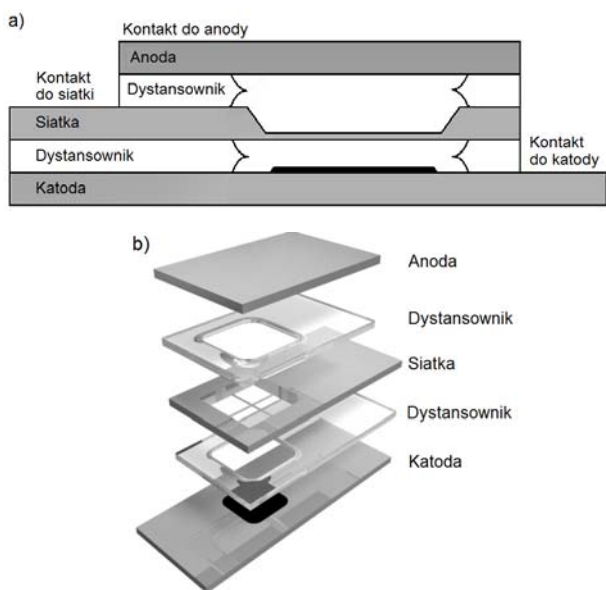
Krytyczny problem zapewnienia wysokiej próżni, koniecznej dla pracy katody polowej, może być rozwiązany dzięki integracji wyrzutni z ostatnio opracowaną przez autorów mikropompą jonowo-sorpcyjną [12].

### Konstrukcja i technologia

Na obecnym etapie badań zaprojektowano i wykonano miniaturową wyrzutnię elektronów, która składa się z trzech elektrod: krzemowej katody z cienką warstwą nanorurek węglowych (CNT), perforowanej elektrody ekstrakcyjnej (siatki) oraz anody (rys. 3). Do wykonania źródła elektronów wykorzystano dwustronnie polerowane, 3-calowe podłoże krzemowe typu n ( $\rho < 1\ \Omega\cdot\text{cm}$ ) o orientacji krystalograficznej (100) i grubości 400  $\mu\text{m}$  oraz 3-calowe podłoże szklane (Borofloat 3.3, Schott, Niemcy) o grubości 700  $\mu\text{m}$ . Wszystkie elementy źródła przygotowano niezależnie, a następnie połączono je w jeden układ.

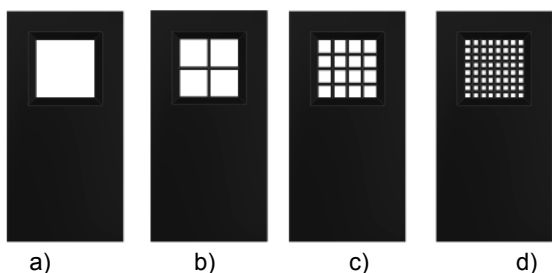
Warstwę emisyjną CNT o powierzchni  $5\times 5\ \text{mm}^2$  naniesiono selektywnie na podłoże krzemowe ( $24\times 12\times 0,4\ \text{mm}^3$ ) metodą elektroforetyczną ( $U = 300\ \text{V}$ ,  $t = 2\ \text{min}$ ). Komercyjnie dostępne jednościenne nanorurki węglowe (Cheaptubes, USA) osadzono z roztworu koloidalnego składającego się z alkoholu izopropylowego oraz azotanu magnezu, który poprawia dyspersję oraz przyczepność

nanorurek do podłoża. Po procesie nanoszenia katodę wygrzewano w powietrzu (0,5 godziny, 100 °C), w celu odparowania substancji lotnych i utlenienia związków magnezu, które łączą nanorurki z podłożem.



Rys. 3. Przekrój (a) oraz wizualizacja poszczególnych elementów wyrzutni polowej MEMS (b)

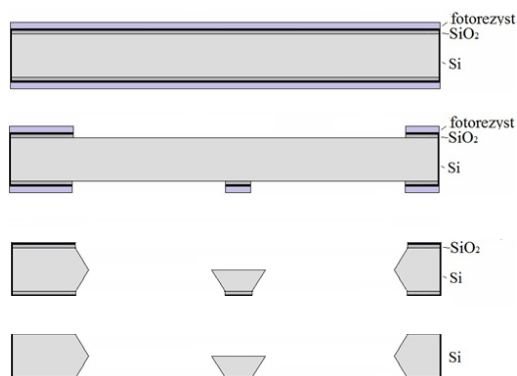
Elektrodę ekstrakcyjną (siatkę) wykonano z podłoża krzemowego przyciętego na wymiar  $20 \times 12 \times 0,4 \text{ mm}^3$ . W celu zbadania wpływu konstrukcji elektrody na pracę źródła elektronów zaprojektowano 4 rodzaje siatek, w których wykonano od 1 do 64 kwadratowych otworów o boku 150, 700, 1800 lub 4000  $\mu\text{m}$  (rys. 4). Najpierw utleniono termicznie podłoże krzemowe dla uzyskania dwutlenku krzemu o grubości 1,2  $\mu\text{m}$  (rys. 5). Następnie, odwzorowano maskę tlenkową metodą dwustronnej fotolitografii (rys. 5). Otwory trawiono anizotropowo z dwóch stron podłoża, w wodnym roztworze wodorotlenku potasu, w temperaturze 80°C, aż do całkowitego przetrawienia podłoża.



Rys. 4. Wizualizacja różnych elektrod ekstrakcyjnych zastosowanych w źródle elektronów: a) z jednym, b) z czterema, c) z szesnastoma, d) z 64 otworami

Anodę wykonano z podłoża krzemowego o wymiarach  $16 \times 12 \times 0,4 \text{ mm}^3$ . Elektrody krzemowe odizolowano od siebie za pomocą szklanych dystansowników o wymiarach  $20 \times 12 \times 0,7 \text{ mm}^3$  oraz  $16 \times 12 \times 0,7 \text{ mm}^3$ . Otwory w dystansownikach ( $5 \times 5 \times 0,7 \text{ mm}^3$ ) wykonano metodą trawienia izotropowego szkła w wodnym roztworze kwasu fluorowodorowego (40% HF).

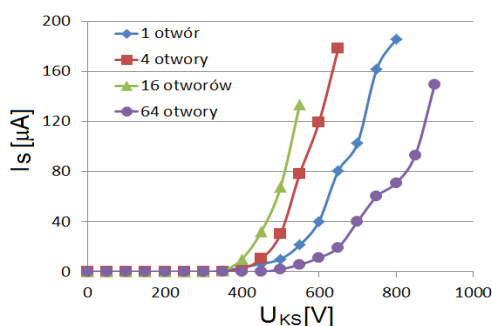
Zaletą opracowanego źródła elektronów MEMS jest to, że jego elementy stanowią jednocześnie obudowę próżniową, a elektrody krzemowe umożliwiają podłączenie zasilania. W wypadku potrzeby podłączenia wyprowadzeń drutowych, na zewnętrznej powierzchni elektrod należy wykonać kontakty metaliczne.



Rys. 5. Etapy formowania siatki źródła elektronów z czterema otworami

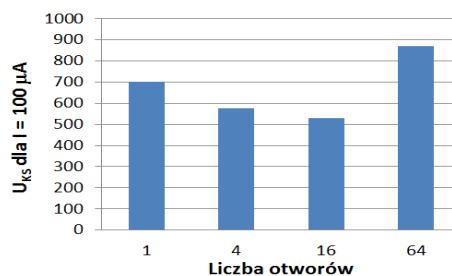
## Wyniki

Wykonane struktury testowe scharakteryzowano w referencyjnej, bezolejowej komorze próżniowej ( $3 \times 10^{-5}$  hPa). W pierwszej kolejności zmierzono zależność prądu emisji polowej od napięcia katoda-siatka dla siatek z różną liczbą otworów. Przy tych pomiarach anoda nie była spolaryzowana (rys. 6).



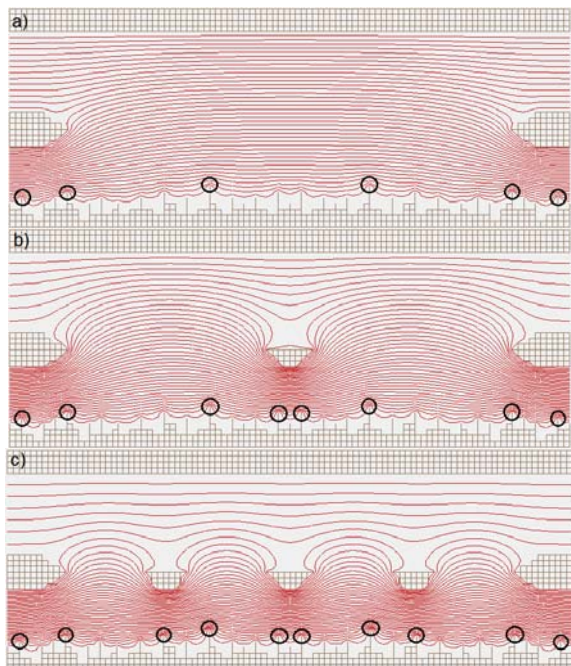
Rys. 6. Charakterystyki  $I_s$ - $U_{KS}$  ( $I_s$ ) dla różnych siatek

Wartość progowa napięcia ( $I_s = 1 \mu\text{A}$ ) dla każdej ze struktur wynosiła ok. 400 V. Wraz ze wzrostem liczby otworów w siatce napięcie niezbędne do uzyskania określonej wartości prądu emisji polowej malało, jedynie dla 64 otworów znacznie wzrosło (rys. 7).

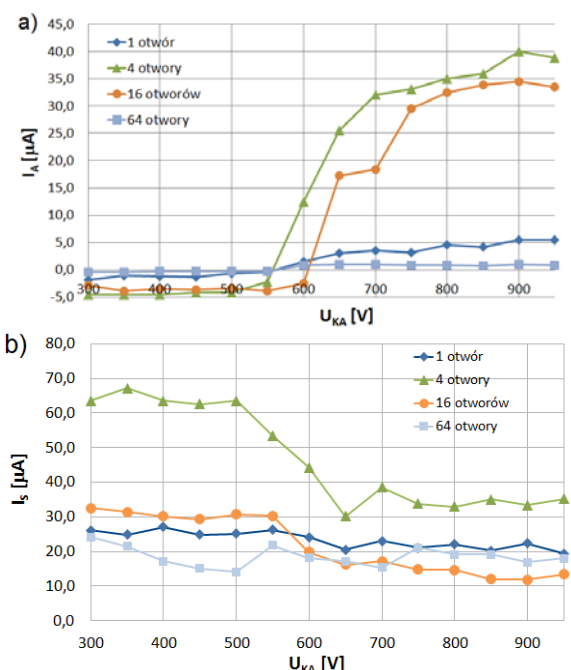


Rys. 7. Napięcie  $U_{KS}$  niezbędne do uzyskania prądu  $I_s = 100 \mu\text{A}$  w funkcji liczby otworów w siatce

Na podstawie symulacji przeprowadzonych w programie SIMON stwierdzono, że gdy w siatce znajduje się jeden duży otwór, zagęszczenie linii ekwipotencjalnych jest największe wokół nanorurek znajdujących się przy krawędzi otworu, a więc emisja następuje głównie z tego obszaru (rys. 8). Zmniejszenie otworów w siatce (wprowadzenie nowych krawędzi) powoduje uaktywnienie emisji również z centrum katody, stąd wzrost wartości prądu dla 4 i 16 otworów. Zmniejszenie się wartości prądu dla struktury z siatką z 64 otworami można tłumaczyć obecnością ładunku przestrzennego pomiędzy katodą i siatką, który prawdopodobnie blokuje emisję.



Rys. 8. Symulacja przebiegu linii ekwipotencjalnych dla struktur testowych z zaznaczonymi głównymi centrami emisyjnymi (nanorurkami) dla siatek z: a) 1, b) 4 i c) 16 otworami.

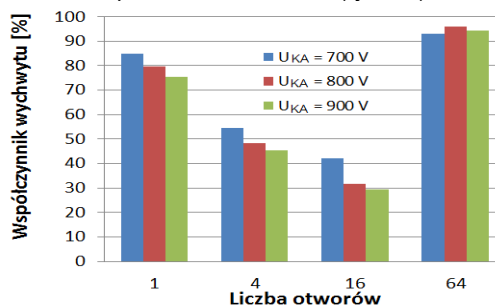


Rys. 9. Charakterystyki emisji zmierzone dla 4 rodzajów siatki: a) prąd anody w funkcji napięcia  $U_{KA}$ , b) prąd siatki w funkcji napięcia  $U_{KA}$ ;  $U_{KS} = 600$  V

W następnym etapie badań sprawdzono pracę źródła elektronów o trójelektrodowej konfiguracji. W zależności od relacji napięcia na anodzie do napięcia na siatce prąd emitowany z katody może być zbierany przez każdą z elektrod w różnych proporcjach (rys. 9). Gdy napięcie  $U_{KA}$  przewyższa napięcie  $U_{KS}$  następuje gwałtowny wzrost prądu docierającego do anody. Towarzyszy temu równoczesny spadek prądu siatki. Największą wartość prądu elektronowego zmierzonego na anodzie zanotowano dla źródeł z siatką z 4 i 16 otworami. Przy pojedynczym otworze w siatce prąd emisji był mały, a siatka z 64 otworami przechwytywała większość elektronów.

Na podstawie uzyskanych zależności wyznaczono tzw.

współczynnik wychwytu, czyli stosunek wartości prądu przechwyconego przez siatkę do prądu emitowanego z katody ( $I_K = I_A + I_S$ ). Im współczynnik ten jest niższy, tym więcej elektronów dociera bezpośrednio do anody. Najniższy współczynnik wychwytu, otrzymano dla siatek z 4 i 16 otworami, odpowiednio 50 i 30 % (rys. 10).



Rys. 10. Zależność współczynnika wychwytu siatki od liczby otworów

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono nową konstrukcję polowej wyrzutni elektronów typu MEMS. Wykonane struktury testowe wykazują dobre właściwości emisyjne. Progowe napięcie emisji prądu wynosi ok. 400 V. Optymalne właściwości źródła można uzyskać dla siatki posiadającej 16 otworów. Do anody dociera wówczas prąd o wartości kilkudziesięciu mikroamperów, a współczynnik wychwytu siatki jest najmniejszy i wynosi 30%.

Prace były finansowane z funduszu badań statutowych Politechniki Wrocławskiej.

### LITERATURA

- [1] W. Zhu, Vacuum microelectronics, A Wiley, 2001.
- [2] Y. Honda, et al., Triple-gated Spindt-type FEA for image sensor with HARP target, Tech. Digest of 24th IVNC 2011, Wuppertal, pp. 14-15.
- [3] D. R. Whaley, R. Duggal, C. M. Armstrong, Low-voltage field emitter array operation in cold cathode TWT, Tech. Digest of 20th IVNC 2007, Chicago, pp. 10-11.
- [4] T. Sakai et al., Electron injection and transport control of diamond for vacuum microelectronic power switch device, Tech. Digest of 13th IVMC 2000, Guangzhou, pp. 5-6.
- [5] J. X. Huang et al., Bayard-Alpert ionization gauge using carbon-nanotube cold cathode, J. Vac. Sci. Technol. B 25 (2) 2007 651-654.
- [6] S. Jung et al., Field-emission X-ray sources with an anisotropic focusing lens for isotropic X-ray focal spots, Tech. Digest of 25th IVNC 2012, Jeju, pp. 66-67.
- [7] P.J. Resnik, E. Langlois, An integrated MEMS vacuum diode, Tech. Digest of 24th IVNC 2011, Wuppertal, pp. 206-207.
- [8] Ch-M. Park, M. S. Lim, M-K. Han, A novel in situ vacuum encapsulated lateral field emitter triode, IEEE Electron Device Letters 18, 11 (1997) 538-540.
- [9] H. S. Kim et al., The assembly of a fully functional microcolumn and its STEM-Mode operation, Journal of the Korean Physical Society 43, 5 (2003) 831-835.
- [10] F. Floreania, H.W. Kooops, W. Elser, Concept of a miniaturized free-electron laser with field emission source, Nuclear Instr. and Methods in Physics Research A 483 (2002) 488-492.
- [11] Ch. M. Tassetti et al., A MEMS electron impact ion source integrated in a microtime-of-flight mass spectrometer, Sensors & Actuators B 189 (2013) 173-176.
- [12] T. Grzebyk, A. Górecka-Drzazga, Koncepcja integracji mikrosystemu typu MEMS z miniaturowaną pompą próżniową, Materiały Konf. ELTE2013, Ryn, s. 289-290.

**Autorzy:** dr inż. Tomasz Grzebyk, tomasz.grzebyk@pwr.edu.pl, inż. Piotr Szyszka, 186120@student.pwr.edu.pl, dr hab. inż. Anna Górecka-Drzazga, anna.gorecka-drzazga@pwr.edu.pl  
Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, ul. Janiszewskiego 11/17, 50-372 Wrocław