

Miniaturowe źródła promieniowania rentgenowskiego

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd literaturowy na temat konstrukcji i technologii różnego typu miniaturowych lamp rentgenowskich. Opisano przykłady źródeł rentgenowskich wykorzystujących efekt piroelektryczny oraz źródeł z termiczną i polową wyrzutnią elektronów. Artykuł zakończono prezentacją koncepcji zintegrowanej lampy rentgenowskiej on-chip, wytworzonej metodami mikroinżynierii. W konstrukcji wykorzystano miniaturowe polowe źródło elektronów z katodą z nanorurek węglowych oraz ostatnio opracowaną mikropompę wysokiej próżni. (*Miniature X-Ray sources*)

Abstract. The article presents an overview of literature on the design and technology of various types of miniature X-ray tubes. Examples of the X-ray tubes using the pyroelectric effect and tubes with the thermal and field-emission electron sources have been described. At the end the concept of X-ray source integrated on-chip made by the use of microengineering methods is presented. In the construction a miniature field-emission electron source with carbon nanotube cathode and a recently developed high-vacuum micropump are applied.

Słowa kluczowe: miniaturowa lampa X, MEMS, emisja polowa, mikroinżynieria.

Keywords: miniature X-ray tube, MEMS, field emission, microengineering.

doi:10.12915/pe.2014.11.30

Wstęp

W lampach rentgenowskich, wiązka elektronów przyspieszana jest w bardzo silnym polu elektrycznym (10–100 kV), a następnie zostaje gwałtownie wyhamowana na materiale anody tzw. targecie. Skutkiem tego procesu fizycznego jest m.in. emisja promieniowania rentgenowskiego X (0,01–10 nm). Parametry wiązki promieniowania X zależą głównie od rodzaju źródła elektronów, konfiguracji elektrod, materiału targetu oraz poziomu próżni. Im wyższa próżnia tym mniejsze rozpraszanie wiązki elektronów oraz mniejsze prawdopodobieństwo powstawania wyładowania elektrycznego i przepływu prądu jonowego obniżającego żywotność katody.

Klasyczne źródła promieniowania rentgenowskiego wykorzystywane są powszechnie w radiodiagnostyce medycznej, radioterapii, radiografii przemysłowej, krystalografii rentgenowskiej. Ich wady to wysoki pobór mocy, konieczność stosowania chłodzenia anody, skomplikowana budowa i duża masa. Obecnie w przemyśle rośnie zapotrzebowanie na mobilne systemy XRF (spektrometria fluorescencji rentgenowskiej) oraz XRD (dyfraktometria rentgenowska), które służą do analizy składu chemicznego różnych materiałów (rys. 1a). Rozwija się również rynek przenośnych instrumentów medycznych dla diagnostyki i leczenia ludzi oraz zwierząt (rys. 1b). W Polsce badania nad miniaturowym systemem rentgenowskim do zastosowań medycznych tzw. igłą fotonową prowadzi od lat Narodowy Instytut Badań Jądrowych w Świerku (rys. 1c).



Rys. 1. Przenośne systemy rentgenowskie: a) urządzenie Niton™ XL3p XRF, Thermo Fisher Scientific, Inc. (USA) [1], b) dentystyczny aparat rentgenowski NOMAD Pro firmy Aribex, Inc. (USA) [2], c) igła fotonowa do naświetlań kooperacyjnych opracowana w NCBJ w Świerku [3]

Intensywne badania nad przenośnymi urządzeniami rentgenowskimi są prowadzone w wielu ośrodkach

naukowych na świecie. Powstają różne konstrukcje miniaturowych lamp i detektorów promieniowania. Głównym problemem naukowym jest uzyskanie wyrzutni elektronów o małej plamce i krótkiej ogniskowej, co pozwoliłoby na umieszczenie badanego obiektu blisko źródła i uzyskanie ostrego i powiększonego obrazu. Miniaturowe lampy wytwarzane są głównie z zastosowaniem technik mechaniki precyzyjnej, klasycznych metod łączenia metalu ze szkłem lub ceramiką oraz nowoczesnych technik mikroinżynieryjnych. Prace w tej dziedzinie zaowocowały pojawieniem się ostatnio na rynku pierwszych miniaturowych lamp rentgenowskich, wykorzystujących do emisji elektronów efekt piroelektryczny (Amptek Inc., USA), katody termiczne oraz katody polowe (Moxtek Inc. USA).

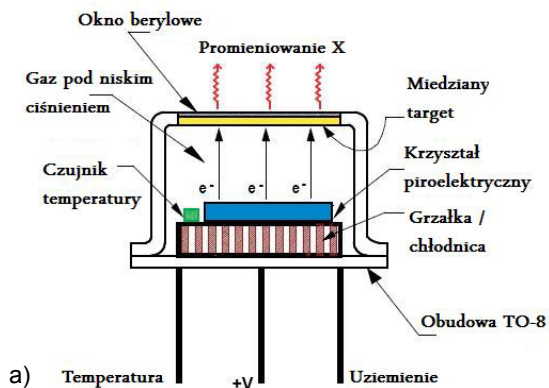
W niniejszej pracy zostaną przedstawione przykłady konstrukcji miniaturowych lamp X oraz koncepcja nowej konstrukcji lampy zintegrowanej on-chip, wytworzonej technikami mikroinżynieryjnymi (MEMS, Mikro-Elektro-Mechaniczny System).

Miniaturowe źródła wykorzystujące efekt piroelektryczny

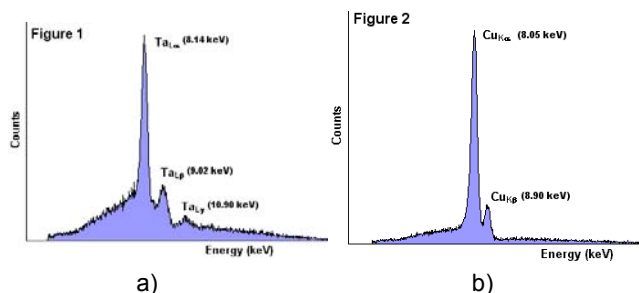
Po raz pierwszy efekt piroelektryczny został wykorzystany do uzyskania promieniowania rentgenowskiego przez Brownridge [4] w 1992 roku. Efekt piroelektryczny polega na powstawaniu ładunku na powierzchni kryształów ferroelektrycznych o niezerowej polaryzacji spontanicznej (np. LiTaO_3 , LiNbO_3 i CsNO_3) pod wpływem zmiany temperatury. Podczas cykli chłodzenia i grzania jedna powierzchnia odpowiednio przyciętego kryształu (o grubości 1–3 mm) ładuje się dodatnio, druga ujemnie. Jeśli kryształ znajduje się w powietrzu ładunek ten jest szybko neutralizowany przez ładunki swobodne. Jeśli kryształ znajduje się w obniżonym ciśnieniu, to po zmianie temperatury przy jego powierzchni przez jakiś czas utrzymuje się silne pole elektryczne ok. 10^6 V/cm [5]. Następuje emisja elektronów z dużą energią (od kilkuset eV do kilkuset tysięcy eV), które uderzając w anodę powodują emisję promieniowania X.

Obecnie dostępne są na rynku miniaturowe źródła promieniowania rentgenowskiego firmy Amptek, które wykorzystują efekt piroelektryczny (rys. 2) [6]. Źródło to charakteryzuje się małymi wymiarami 15×10 mm² i może być zasilane baterią 9 V [7]. Maksymalna energia elektronów uderzających w target Cu wynosi 35 kV. Generują one słabe, pulsacyjne promieniowanie, którego intensywność zmienia się w takt grzania i schładzania kryształu. Podgrzewanie kryształu LiTaO_3 (moduł Peltiera)

powoduje, iż jego górna powierzchnia uzyskuje polaryzację dodatnią i przyciąga elektrony z powietrza znajdującego się pod niskim ciśnieniem. Elektrony uderzają o powierzchnię kryształu emitując promieniowanie charakterystyczne dla tantalu, oraz promieniowanie hamowania (rys. 3a). Podczas chłodzenia kryształu, na skutek zmiany zwrotu polaryzacji spontanicznej, elektrony z górnej powierzchni kryształu zostają przyspieszone w kierunku miedzianego targetu. Powstaje wtedy promieniowanie charakterystyczne miedzi i promieniowanie hamowania (rys. 3b). Cykl grzania i chłodzenia kryształu zmienia się w przedziale od 2 do 5 minut.



Rys. 2. Źródło COOL-X firmy Amptek wykorzystujące efekt piroelektryczny: a) budowa, b) fotografia [6,7]



Rys. 3. Charakterystyki widmowe promieniowania X uzyskane podczas grzania (a) i chłodzenia (b) kryształu piroelektrycznego [6]

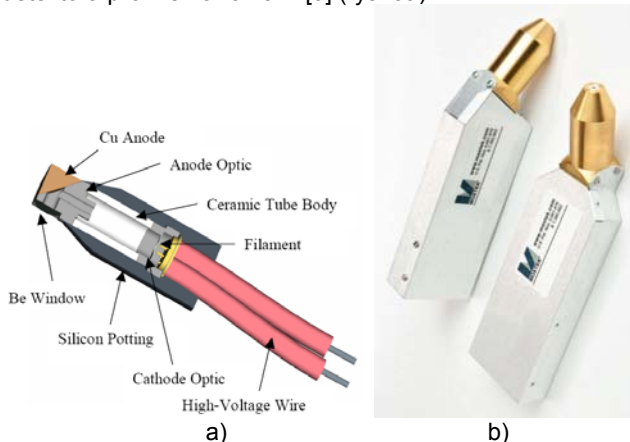
Miniaturowe źródła z katodą termiczną

W roku 1991 naukowcy z Svetlana Special Design Office (Leningrad) opublikowali miniaturową lampę X, która pracowała przy napięciu 45 kV i prądzie 200 μ A (9 W) (rys. 4) [8]. Zastosowano 3-elektrodowy układ z anodą wykonaną z rurki metalowej o długości 35 mm i średnicy 8 mm, i targetem usytuowanym na jej końcu. Pierścieniowy stały magnes na rurce anody skupiał wiązkę do plamki o średnicy 40 μ m.



Rys. 4. Lampa rentgenowska 50-kV BS-1 (średnica 40 mm, długość 400 mm) [8]

Dla porównania standardowa lampa RU-200 z obrotową anodą pracuje przy 60 kV, 200 mA (12 kW) i ma wymiary: 1,75x0,75x1 m³. W 2012 roku opublikowano informację o opracowaniu w Moxtek, Inc. miniaturowego instrumentu (42x15 mm²) zdolnego do jednoczesnego przeprowadzenia analizy XRF i XRD z zastosowaniem kamery CCD jako detektora promieniowania X [9] (rys. 5a).



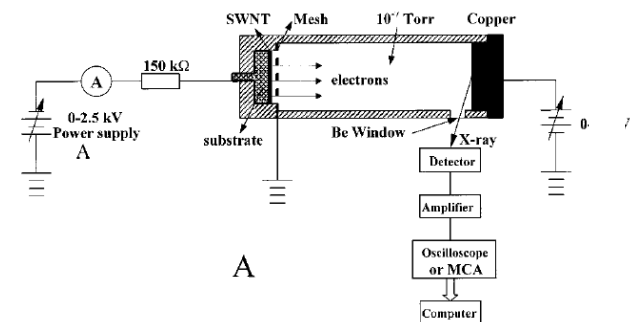
Rys. 5. Miniaturowa lampa rentgenowska firmy Moxtek, Inc.: a) schemat [9], b) bateryjnie zasilana handlowa wersja [10]

Lampa składa się z bocznego okienka berylowego, uziemionej miedzianej anody, katody termicznej (grzejnik wolframowy) zamontowanej na obudowie TO-5, ceramicznej rurki izolującej anodę i katodę oraz układu skupiającego wiązkę elektronów na anodzie. Lampa pracuje przy 17,5 kV i 95 μ A, przy całkowitym poborze mocy 4,4 W. Wymiary dostarczanego wraz z lampą zasilacza wynoszą 3x7x17 cm³. Prototyp tej lampy był rozwijany w NASA Ames Research Center w celu badania składu minerałów podczas misji kosmicznych. Obecnie Moxtek reklamuje zoptymalizowaną wersję zasilaną baterią (rys. 5b) [10].

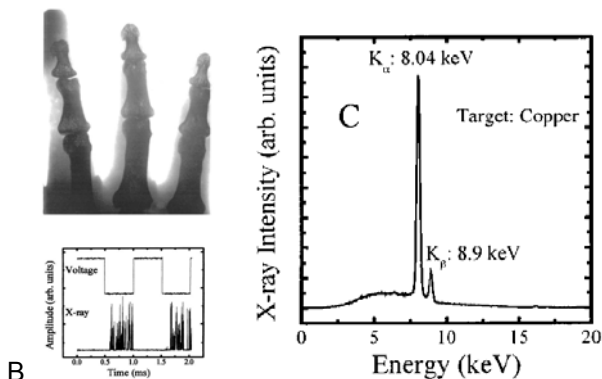
Miniaturowe źródła wykorzystujące emisję polową z nanorurek węglowych

W roku 2002 opublikowano lampę rentgenowską z katodą polową wykonaną z jednościennej nanorurek węglowych (SWNT) [11, 12]. Konstrukcję tę testowano w komorze próżniowej o ciśnieniu 10⁻⁷ Torr (rys. 6 A). Warstwa nanorurek została naniesiona na płaski metalowy dysk za pomocą metody elektroforetycznej. Metalowa siatka była umieszczona w odległości 50–200 μ m od katody i uziemiona. Ujemne napięcie podłączono do katody, natomiast dodatnie do miedzianej anody. Uzyskano spektrum promieniowania rentgenowskiego z wyraźnymi liniami Cu K α i K β (rys. 6C) co pozwoliło otrzymać wyraźne obrazy ludzkiej dłoni na błonie fotograficznej (rys. 6B). Zastosowano zasilanie impulsowe o częstotliwości 1 kHz, wygenerowanej za pomocą zmian napięcia na siatce. Zaobserwowano opóźnienie rzędu 100 μ s pomiędzy pojawieniem się napięcia na siatce, a emisją fotonu promieniowania rentgenowskiego.

Kolejną wersję miniaturowej lampy rentgenowskiej z katodą CNT, podłączoną do zewnętrznego systemu pompowego, przedstawiono w 2011 roku [13]. Zastosowano podwójną soczewkę skupiającą, która pozwoliła otrzymać ognisko wiązki elektronów o średnicy 0,3 mm w odległości 10 mm od powierzchni katody. Lampa składała się z części metalowych (kovar), połączonych z rurką ceramiczną oraz anody molibdenowej umieszczonej na miedzianym bloku (rys. 7). Katoda CNT została wykonana za pomocą specjalnie opracowanej pasty CNT, z wypełniaczem poprawiającym przyczepność nanorurek.

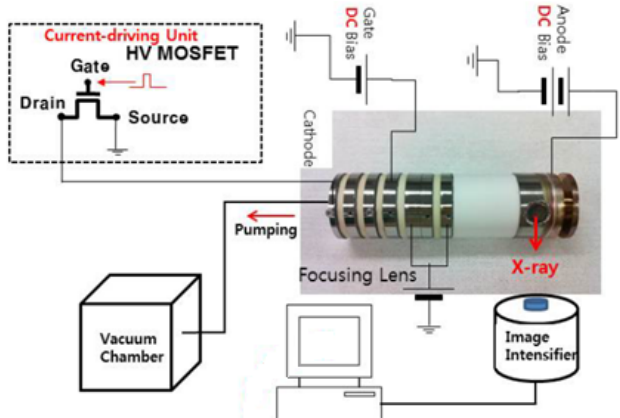


A



B

Rys. 6. Lampa rentgenowska z katodą polową CNT w konfiguracji triodowej: A) schemat, B) obraz ludzkiej dłoni na błonie fotograficznej umieszczonej poza komorą próżniową oraz charakterystyka emisyjna dla lampy pracującej w trybie impulsowym, C) spektrum promieniowania rentgenowskiego, $U_A = 14$ kV [11]

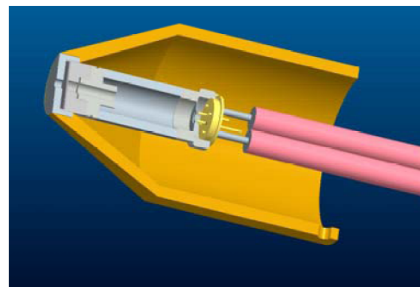


Rys. 7. Układ pomiarowy miniaturowej lampy rentgenowskiej z katodą polową CNT [13]

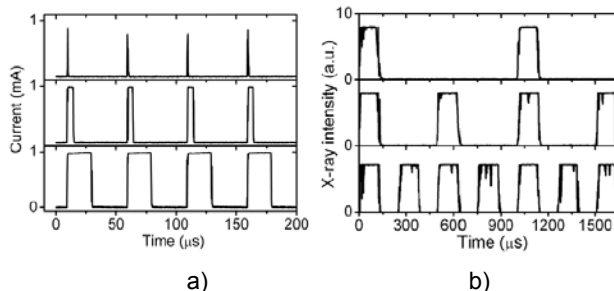
W konstrukcji tej niestabilność prądu katody została zmniejszona (z 15% do 2%) przez zastosowanie wysokonapięciowego półprzewodnikowego przełącznika podłączonego do katody.

Firma Moxtek w 2005 roku zaprezentowała swoją konstrukcję miniaturowej lampy rentgenowskiej z katodą CNT (rys. 8) [14]. Warstwa nanorurek węglowych została osadzona na podstawie TO-5. Do uzyskania prądu emisji na poziomie 100 μ A katoda wymagała dostarczenia ok. 0,2 W mocy wejściowej. Jako materiał anody zastosowano warstwę srebra napyłoną na berylowe okno wyjściowe.

Zaletą lampy w porównaniu z wcześniejszą konstrukcją z katodą termiczną była możliwość pracy w trybie impulsowym (rys. 9).



Rys. 8. Wizualizacja lampy X firmy Moxtek, Inc. [14]



a)

b)

Rys. 9. Prąd katody CNT (a) oraz intensywność promieniowania rentgenowskiego (b) dla lampy firmy Moxtek, Inc. pracującej w trybie impulsowym [14]

Praca lampy była testowana przez 700 godzin. Aby utrzymać stabilny prąd anody 20 μ A zmieniano napięcie bramki od 360 V na początku pracy do 670 V po 700 godzinach.

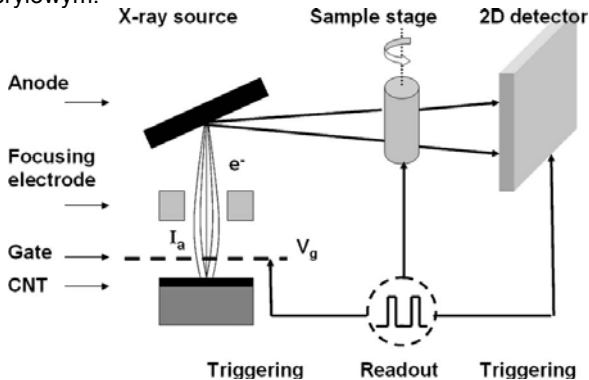
W 2004 r. opublikowano wyniki badań [15] nad źródłami promieniowania rentgenowskiego z katodami CNT, które były przeznaczone do rentgenowskiej spektrometrii fluorescencyjnej (XRF) oraz dyfraktometrii (XRD) podczas wypraw kosmicznych. Projekty kosmiczne wymagają źródeł promieniowania rentgenowskiego o małym ognisku, o niewielkich gabarytach, małym ciężarze, solidnej konstrukcji i dużej sprawności. Opisane katody polowe wykonano z wielościennych nanorurek węglowych (MWCNT) wytworzonych metodą CVD z zastosowaniem katalizatora (nanowarstwa Fe). Z katody o średnicy 2 mm uzyskano prąd emisji rzędu kilku mA. Stabilny prąd o gęstości 1 A/cm² uzyskiwano także z katod o średnicy 100 μ m. Konstrukcja ta była rozwijana przez Oxford Instruments X-Ray Technologies, Inc. (rys. 10). Katodę CNT z bramką oraz optyką elektronową (plamka 50 μ m) umieszczono w małej ceramicznej obudowie o rozmiarach 160×38 mm². Wydajność lampy wynosiła ok. 80% (50% dla lamp termoeemisyjnych). Lampa o mocy 3 W wraz z zasilaczem ważyła 300 g i była zasilana z baterii.



Rys. 10. Miniaturowa lampa rentgenowska z katodą polową CNT firmy Oxford Instruments, Inc. [15]

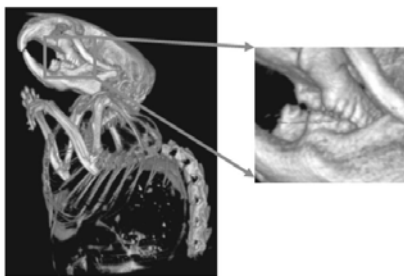
W roku 2005 opublikowany został artykuł opisujący „mikrotomograf komputerowy” [16]. Na metalowe podłoże katody osadzono elektroforetycznie jednościenne nanorurki węglowe o losowej orientacji (rys. 11). Uzyskana w ten sposób katoda miała 1 mm średnicy (plamka 150 μ m). Nad

katodą zamontowano metalową siatkę wolframową z drutu o średnicy 25 μm i przejrzystości optycznej 81%. Pełniła ona rolę elektrody ekstrakcyjnej. Nad siatką umieszczono elektrodę skupiającą w postaci metalowego walca. Jako anodę, zastosowano płytkę molibdenową o grubości 0,6 mm. Prąd anody był kontrolowany napięciem bramki. Energia fotonów promieniowania X była sterowana za pomocą napięcia anody (0–60 kV). Urządzenie zostało zamontowane w komorze próżniowej (10^{-7} Torr) z oknem berylowym.



Rys. 11. Schemat mikrotomografu komputerowego [16]

Emisję połową elektronów uzyskano przy napięciu $V_g > 350$ V. Prąd emisji przy pracy impulsowej osiągnął wartość 10 mA (1 A/cm^2 , $15 \text{ V}/\mu\text{m}$). Wykonano zdjęcia małych zwierząt przy napięciu $V_A = 40$ kV (rys. 12). W ciągu 12 godzin pracy lampy prąd emisji zmniejszył się z początkowych 210 μA do 200 μA .

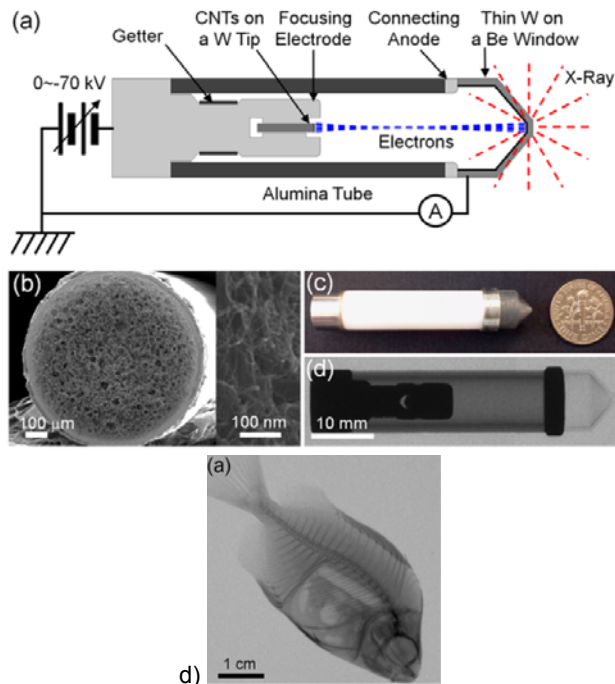


Rys. 12. Zdjęcia myszy wykonane za pomocą mikrotomografu komputerowego, $V_A = 40$ kV [16]

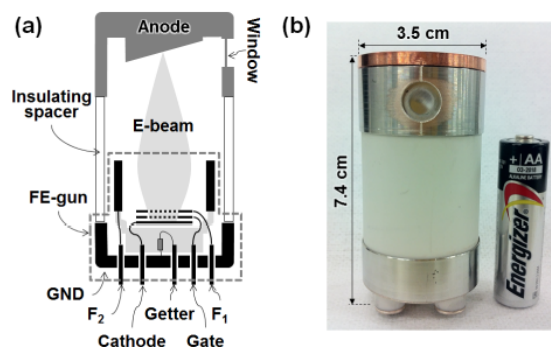
W 2012 roku opublikowano lampę o konfiguracji diodowej, uszczelnioną próżniowo z wykorzystaniem klasycznej techniki łączenia ceramiki z metalem metodą lutowania (rys. 13) [17]. Zastosowano katodę połową z drutu wolframowego (0,8 mm), na który naniesiono warstwę CNT. Katoda została umieszczona wewnątrz elektrody skupiającej w obudowie z kowaru. Obudowa została odizolowana od kowarowej anody i targetu ceramiczną rurką (średnica wew. 7 mm, zewn. 10 mm). Target wykonano w postaci stożkowo zakończonego okna berylowego z napyłoną warstwą wolframu o grubości 1,5 μm . Prąd katody był zmierzony i elektrody lampy były pozycjonowane w komorze próżniowej, przed procesem lutowania. Następnie, części lampy były wygrzewane w 500°C przez 10 godzin, potem lutowane w próżni (680°C , 30 min). Do poprawy próżni zastosowano geter, który był aktywowany podczas procesu lutowania. Przy napięciu 50 kV i prądzie katody 250 μA ($\pm 2\%$) uzyskano promieniowanie $108 \text{ Gy}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$ ($\pm 3\%$), co uznano za dobry wynik (wystarczający dla zastosowań medycznych).

W roku 2013 opublikowano konstrukcję wieloelektrodowej lampy X uszczelnionej próżniowo [18]. Wszystkie metalowe części: anoda, katoda, elektrody

skupiające i przepusty elektryczne zostały wykonane z kowaru, natomiast część izolująca z ceramiki alundowej (rys. 14). Specjalnie opracowaną pastę CNT naniesiono metodą drukowania na katodę kowarową. Target stanowiła warstwa wolframowa o grubości 0,1 mm, naniesiona na podstawę Cu. Wszystkie części wykonano metodami mechanicznymi, a przed połączeniem wygrzewano je w próżni (800°C). Lutowanie próżniowe wykonano dwuetapowo. Najpierw połączono elementy wyrzutni oraz anody (810°C), potem lutowano wyrzutnię i anodę do ceramiki (715°C). Uzyskano dużą wartość prądu emisji katody 50 mA oraz małą średnicę plamki ok. 0,3 mm.



Rys. 13. Miniaturowa lampa X (długość 150 mm, waga 14,5 g): a) schemat, b) katoda pokryta CNT, c) fotografia i zdjęcie rentgenowskie lampy, d) zdjęcie małej surowej ryby wykonane za pomocą lampy [17].



Rys. 14. Schemat (a) i fotografia miniaturowej, uszczelnionej próżniowo lampy X [18]

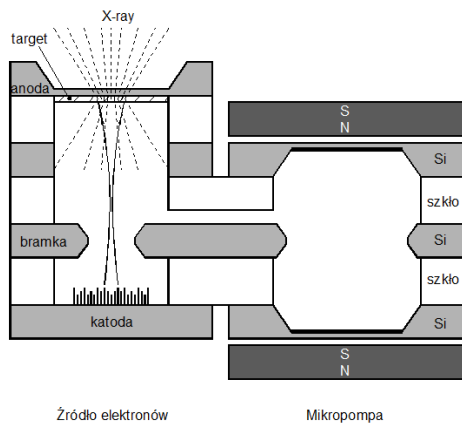
Koncepcja konstrukcji miniaturowego źródła MEMS

Opublikowane i obecne na rynku miniaturowe lampy rentgenowskie są realizacją makro rozwiązań w mikro skali. Najbardziej nowoczesne rozwiązania wykorzystują miniaturowe wyrzutnie elektronów z katodą połową CNT. Są one wykonywane z zastosowaniem technik klasycznych i mikroinżynierskich. Do uszczelnienia próżniowego mikrolampy stosuje się głównie klasyczną metodę lutowania ceramiki z metalem (kowarem) w stanowisku próżniowym, w połączeniu z techniką geterów. Metody te nie są kompatybilne z techniką mikrosystemów MEMS. Aby wytworzyć lampę X typu MEMS, wszystkie jej elementy

łącznie z obudową muszą być materiałowo i technologicznie spójne i wykonane z zastosowaniem technik mikroinżynieryjnych. Najważniejszym problemem jest zapewnienie stabilnej i wysokiej próżni wewnątrz miniaturowego urządzenia.

Bazując na ostatnio uzyskanych wynikach badawczych [19] powstała koncepcja wytworzenia zintegrowanego źródła promieniowania rentgenowskiego – lampy X on-chip. Wszystkie elektrody będą wykonane z warstw krzemu i odizolowane od siebie warstwami szkła borokrzemowego (rys. 15). Katoda wyrzutni polowej będzie wytworzona z warstwy nanorurek węglowych naniesionych na podłożu krzemowe metodą elektroforetyczną. Anodę będzie tworzyła cienka membrana krzemowa, a target cienka warstwa napylnego na anodę metalu. Promieniowanie rentgenowskie powstałe na skutek uderzenia elektronów o dużej energii w metalowy target będzie się rozprzestrzeniać we wszystkich kierunkach. Polowa wyrzutnia elektronów będzie zintegrowana z mikropompą próżniową MEMS. Charakterystyczną cechą tej konstrukcji jest brak zewnętrznej obudowy, którą stanowią krzemowo-szklane elementy lampy X typu MEMS.

Zaletą proponowanego rozwiązania jest pełna kompatybilność technologiczna wyrzutni i opracowanej niedawno jonowo-sorpcyjnej mikropompy. Lampa X on-chip stanowi autonomiczne, aktywnie pompowane miniaturowe urządzenie, które będzie pracować w warunkach wysokiej i stabilnej próżni ok. 10^{-6} hPa.



Rys. 15. Schemat konstrukcji miniaturowej lampy rentgenowskiej on-chip zintegrowanej z mikropompą wysokiej próżni

Realizacja przedstawionej koncepcji wymaga rozwiązania wielu problemów technologicznych takich jak: opracowanie zespołu anoda-target, katody polowej CNT o stabilnej emisji, sposobu doprowadzenia zasilania elektrod wyrzutni i mikropompy oraz procedury szczelnego łączenia krzemowo-szklanej wielowarstwowej struktury. Doświadczenie konstrukcyjno-technologiczne oraz osiągnięcia naukowe Zespołu badawczego pozwalają mieć nadzieję na pozytywny wynik realizacji przedstawionego zamierzenia.

Praca była finansowana częściowo z funduszu badań statutowych Politechniki Wrocławskiej oraz projektu badawczego NCN OPUS 5 2013/09/B/ST7/01602.

LITERATURA

- 1 <http://www.thermoscientific.com/en/product/niton-xl3p-xrf-analyzer.html>
- 2 <http://aribex.com/portable-x-ray-machine/dental-x-ray-machine/nomad-pro/>
- 3 <http://www.ncbj.gov.pl/node/1173>
- 4 J. D. Brownridge, Pyroelectric X-ray generator, *Nature* 358 (1992) 287–288
- 5 J. D. Brownridge, S. M. Shafroth, Self-focused electron beams produced by pyroelectric crystals on heating or cooling in dilute gases, *Applied Physics Letters* 79, 20 (2001) 3364–3366.
- 6 www.amptek.com/coolx.html, 20.04.2014.
- 7 J. Kawai, High-sensitivity small-size X-ray fluorescence spectrometers, *Guest Forum* 12 (2008) 52–56.
- 8 A. S. Bugaev et al., Low-power X-ray tubes (the current state), *Physics – Uspekhi* 56, 7 (2013) 691–703.
- 9 S. Cornaby et al., Simultaneous XRD/XRF with low-power X-ray tubes, JCPDS-International Centre for Diffraction Data 2002, *Advances in X-ray Analysis* 45 (2002) 34–40.
- 10 50 kV MAGNUM X-ray source, karta katalogowa, www.moxtek.com, 20.04.2014.
- 11 G. Z. Yue, Generation of continuous and pulsed diagnostic imaging X-ray radiation using a carbon-nanotube-based field-emission cathode, *Applied Physics Letters* 81, 2 (2002) 355–357.
- 12 Y. Cheng, Electron field emission from carbon nanotubes, *C. R. Physique* 4 (2003) 1021–1033.
- 13 S. Choi et al., Smart x-ray tube based on CNT emitters for stationary tomosynthesis examination system, *24th International Vacuum Nanoelectronics Conference 2011*, 18–22 July 2011, pp.185–186.
- 14 A. Reyes-Mena et al., Miniature X-ray tubes utilizing carbon-nanotube-based cold cathodes, JCPDS- International Centre for Diffraction Data 2005, *Advances in X-ray Analysis* 48 (2005) 204–209.
- 15 P. Sarrazin, Carbon-nanotube field emission X-ray tube for space exploration XRD/XRF Instrument, International Centre for Diffraction Data 2004, *Advances in X-ray Analysis* 47 (2004) 232–239.
- 16 J. Zhang et al., A nanotube-based field emission x-ray source for microcomputed tomography, *Review of Scientific Instruments* 76 (2005) 094301 (4pp).
- 17 J-W Jeong et al., A vacuum-sealed compact x-ray tube based on focused carbon nanotube field-emission electrons, *Nanotechnology* 24 (2013) 085201 (8pp).
- 18 S. H. Heo et al., A vacuum-sealed miniature X-ray tube based on carbon nanotube field emitters, *Nanoscale Research Letters* 7, 258 (2012) 1–5.
- 19 T. Grzebyk, A. Górecka-Drzazga, J. Dziuban, Glow-discharge ion-sorption micropump for vacuum MEMS, *Sensors and Actuators A* 208 (2014) 113–119.

Anna GÓRĘCKA-DRZAZGA

Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki, Zakład Wydziałowy Mikroinżynierii i Fotowoltaiki
e-mail: anna.gorecka@pwr.wroc.pl