



Druga rewolucja w konstrukcji lamp rentgenowskich

Grzegorz Jezierski

Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, tel. +48 514 638 097, e-mail: g.jezierski@po.edu.pl

Wprowadzenie

Promieniowanie rentgenowskie jest dzisiaj szeroko wykorzystywane już nie tylko w medycynie czy w różnych dziedzinach nauki (fizyka, chemia, biologia, inżynieria materiałowa), ale również w wielu innych dziedzinach – przemyśle, rolnictwie, produkcji żywności oraz farmaceutyków, ochronie środowiska, szeroko pojętym bezpieczeństwie (*security*), a także w obszarze kultury (archeometria i historia kultury oraz sztuki). Natura i właściwości promieniowania rentgenowskiego pozwalają badać wewnętrzne struktury różnych (praktycznie wszystkich) materiałów i obiektów zarówno na poziomie makro-, jak i mikrostruktury. Procesy produkcyjne w przemyśle stają się coraz bardziej złożone. Nowe i coraz bardziej zróżnicowane technologie powodują konieczność stosowania takich rozwiązań w zakresie kontroli, które są w stanie uwidocznić ukryte lub bardzo małe struktury – tzw. obszar NDT¹. Aby zapewnić bezpieczeństwo w dziedzinach takich jak aeronautyka, przemysł motoryzacyjny, niezbędna jest inspekcja stosowanych tam elementów, zespołów czy połączeń. Ciągły trend w kierunku miniaturyzacji i coraz większej zawartości układów elektronicznych w przemyśle elektronicznym pociąga za sobą konieczność stosowania inspekcji rentgenowskiej, umożliwiającej uzyskiwanie dużych powiększeń przy zapewnieniu dużej rozdzielczości uzyskiwanego obrazu. Stąd też obserwuje się dzisiaj bardzo dynamiczny rozwój tzw. mikrotomografii komputerowej.

Jak wiadomo, promieniowanie rentgenowskie wytwarzane jest nie tylko sztucznie przez człowieka, ale występuje ono w naturze (np. Słońce i inne gwiazdy oraz ciała niebieskie, jak planety, komety i in.) W tabeli 1 przedstawiono dostępne techniczne źródła promieniowania rentgenowskiego. W praktyce najczęściej na świecie wykorzystywane są lampy rentgenowskie.

Tabela 1 Techniczne źródła promieniowania rentgenowskiego

Lampy rentgenowskie
Akceleratory cząstek naładowanych:
– akceleratory liniowe
– betatrony
– synchrotrony, w tym laser na swobodnych elektronach XFEL*
Plazmowe źródła promieniowania rentgenowskiego z użyciem:
– wiązek laserowych (<i>Laser Plasma Sources</i>)
– wyładowań elektrycznych (<i>Discharge Plasma Sources</i>)
– wysokiej temperatury w bombie atomowej
Izotopowe źródła promieniowania rentgenowskiego:
Fe-55, Co-57, Cd-109, Gd-153, Am-241
Źródła przetwornikowe β-X
Pm-147/tarcza AL, Sr-90/Y-90/tarcza AL, Kr-85/tarcza C, Tl-204/tarcza Ag

* X-Ray Free-Electron Laser

Pomimo że pierwsze lampy rentgenowskie zbudowano ponad 100 lat temu, ich technologia cały czas nieprzerwanie się rozwija, aczkolwiek zasada działania pozostaje bez zmian. Niemniej konstrukcja lampy rentgenowskiej zawsze pozostaje interesującym tematem.

Lampy gazowane (jonowe) wytwarzające promieniowanie X

Jako że pierwsze lampy wyładowcze stosował angielski uczonec William Crookes (1832-1919), prowadząc różne eksperymenty dotyczące wyładowań elektrycznych w gazach, każdą lampę opartą na niżej wymienionych zasadach nazywano lampą Crookesa. To właśnie z taką lampą eksperymentował w 1895 r. niemiecki fizyk Wilhelm C. Röntgen (1845-1923), dokonując odkrycia nowych nieznanych promieni X². W lampach tych, aby mogło mieć miejsce wyładowanie elektryczne, musiała być obecna niewielka pozostałość gazu, stąd też lampy te nazywano często **lampami gazowanymi** lub **jonowymi**.

Obecność promieniowania kosmicznego powoduje, iż zawsze są obecne jakieś wolne elektrony oraz jony w lampie. Pod

¹ NDT (*Non Destructive Testing*) – badania nieniszczące materiałów i wyrobów.

² W polskiej nomenklaturze promienie X określamy jako promieniowanie rentgenowskie.

wplywem wysokiego napięcia dodatnie jony gazu ulegały przyspieszeniu między elektrodami i bombardując katodę, wyzwalały z niej elektrony. W związku z taką emisją elektronów lampy te nazywano również lampami rentgenowskimi z zimną katodą. Z kolei uwolnione z katody elektrony, ulegając przyspieszeniu pod wplywem przyłożonego z zewnątrz wysokiego napięcia, padając na przeciwległą ściankę bańki, emitowały w niej promienie X. W pierwszych lampach jonowych niekiedy na drodze elektronów umieszczano dodatkową trzecią elektrodę, tzw. antykatodę.



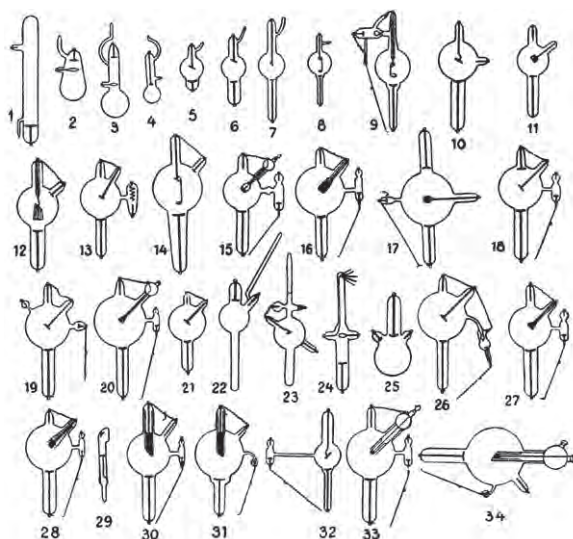
Ryc. 1 Jonowa lampa do wytwarzania promieni X (ok. 1910 r.)
Źródło: [9].

Właściwe działanie pierwszych lamp rentgenowskich (gazowanych, czyli jonowych) zależało od obecności niewielkiej ilości gazu wewnątrz lampy. Jego ilość oraz ciśnienie określały wydajność lampy. Jednakże podczas pracy takiej lampy następowała stopniowa absorpcja cząstek gazu, wskutek czego próżnia w lampie stawała się zbyt wysoka dla przepływu prądu. Wymagało to stosowania coraz wyższego napięcia; mówiono się więc, iż lampa stawała się „twarda”. Jeżeli natomiast było zbyt dużo gazu wewnątrz lampy, gaz ten ulegał zjawisku fluorescencji i również nie były wytwarzane promienie X; lampa stawała się „mięka”. Stąd też, aby zapewnić zadowalającą i jednolitą pracę lamp jonowych, próżnia powinna być utrzymywana na stałym w przybliżeniu poziomie. Na „twardość” czy „miętkość” lampy oprócz samego ciśnienia gazu miały wplyw także takie czynniki, jak: rodzaj gazu (powietrze, dwutlenek węgla, azot czy wodór), odległość między katodą i anodą w lampie, włączenie do lampy iskiernika czy wreszcie gęstość prądu.

Na początku XX wieku wytwarzano wiele rodzajów lamp rentgenowskich (gazowanych), eksperymentując z różnymi ich kształtami, rodzajami anod, jak i regulatorami próżni (Ryc. 2).

Rozwiązanie regulacji próżni w tychże lampach rentgenowskich (gazowanych) wczesnego okresu stwarzało wiele problemów. Wykorzystywano więc różnorodne regulatory utrzymujące próżnię na wymaganym poziomie. Stąd też wśród pierwszych lamp rentgenowskich możemy rozróżnić lampy jonowe bez regulacji próżni oraz lampy jonowe z regulacją próżni.

Należy zaznaczyć, iż lampy jonowe były mało wydajne, jeśli chodzi o emisję promieniowania rentgenowskiego i niesterowalne w tym sensie, iż wielkość prądu anodowego była bezpośrednio związana z wysokim napięciem; wzrost napięcia powodował wzrost prądu.



Müller-Röntgenröhren bis 1914

Ryc. 2 Różnorodne konstrukcje wczesnych lamp do wytwarzania promieni X firmy C.H.F. Müller
Źródło: [1].

Właściwa lampa rentgenowska – pierwsza rewolucja w konstrukcji lamp rentgenowskich

Najbardziej istotnym elementem lampy rentgenowskiej jest samo źródło elektronów, które winno być wydajne, stabilne w czasie, ale także sterowalne w przestrzeni oraz czasie. Niewątpliwie lampy gazowane nie posiadały takiego źródła elektronów. Dopiero w 1913 r. amerykański wynalazca William Coolidge (1873-1976) opatentował „właściwą” lampę rentgenowską, w której zastosował wyodrębnione źródło elektronów w katodzie lampy w postaci grzejącej się spirali wolframowej (2300-2400°C). Wyodrębnienie niezależnego i w dodatku silnego źródła elektronów w postaci żarzonej spirali umożliwilo niezależną regulację prądu anodowego i wysokiego napięcia dla sterowania promieniowaniem X. Zastąpił Coolidge’a było opanowanie technologii wyciągnięcia spirali z kruchego materiału, jakim jest wolfram. Były to więc lampy z gorącą katodą, wykorzystujące zjawisko emisji elektronów z podgrzanego metalu w próżni, co wymagało zastosowania wyższej

Tabela 2 Porównanie lamp rentgenowskich

Wczesne lampy	Współczesne lampy
wypełnione gazem (gazowane, jonowe) (zimna katoda)	próżniowe (gorąca katoda)
ciśnienie: 0,1 Pa – 0,01 Pa (~ 10 ⁻³ –10 ⁻⁴ tor)	ciśnienie: ~ 10 ⁻⁴ Pa (~ 10 ⁻⁶ tor)
niestabilne źródło elektronów	sterowalne źródło elektronów
jako tarczę wykorzystywano ściankę lampy	stosuje się małą metalową tarczkę
brak układu do ogniskowania wiązki elektronów	układ ogniskujący wiązkę elektronów
kształt katody nie jest krytyczny	katoda w postaci żarnika
małe moce lamp – niewielka ilość wydzielanego ciepła	znaczne moce – duże ilości wydzielanego ciepła

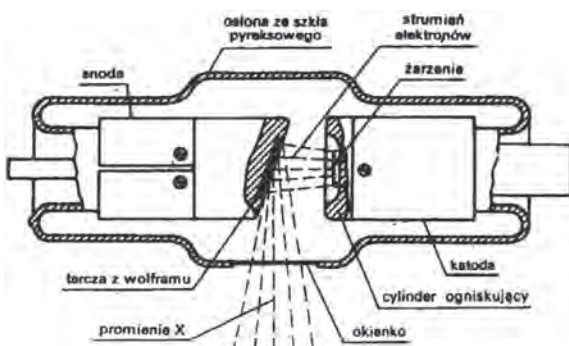


próżni niż w dotychczasowych lampach jonowych. Często istnieją dwa żarniki wolframowe w postaci spirali: mały dla niskiej mocy i lepszej rozdzielczości geometrycznej oraz większy dla większej mocy wyjściowej, o średnicach drutu 0,22 i 0,3 mm.

Warto też odnotować fakt, iż prekursorem lampy Coolidge'a był polski wynalazca Juliusz E. Lilienfeld (1882-1963) urodzony we Lwowie. W 1911 r. na uczelni w Lipsku skonstruował lampę, która miała odrębne źródło elektronów niezależnie od katody, co znacznie czyniło tę lampę dość skomplikowaną i trudniejszą w eksploatacji. Niestety firmy europejskie, jak chociażby niemiecki *Siemens*, nie były zainteresowane komercyjną produkcją tych lamp i ich udoskonalaniem. Za to firma *General Electric*, w której zatrudnienie znalazł po powrocie z Europy W. Coolidge, zrobiła na jego lampie wielki interes.

W. Coolidge, znany jest jako „ojciec lampy rentgenowskiej”, ma na swoim koncie 83 patenty dotyczące konstrukcji różnych lamp rentgenowskich, w tym na coraz to wyższe napięcia (do 900 kV). Lampa z gorącą katodą, a więc typu Coolidge'a stanowi do dzisiaj podstawowy rodzaj lamp rentgenowskich produkowanych przez różne firmy do różnych zastosowań. Schemat takiej lampy rentgenowskiej ze stałą anodą przedstawiono na rycinie 3.

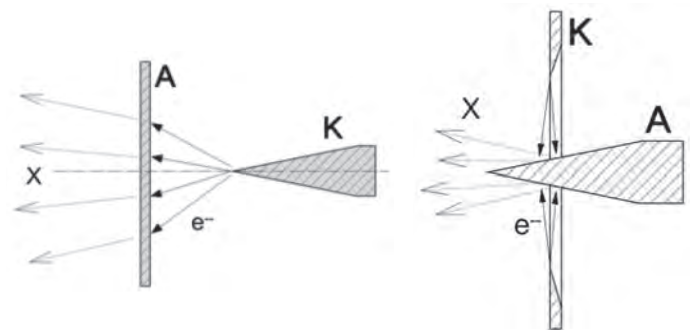
Należy także uzupełnić, iż podczas drugiej wojny światowej pojawiły się lampy rentgenowskie z wykorzystaniem emisji polowej, tj. zimnej emisji elektronów z metalu. W tym przypadku elektrony są „wrywane” z zimnej metalowej katody za pomocą odpowiednio silnego zewnętrznego pola elektrycznego. Pracują one jako lampy impulsowe z czasem trwania impulsu rzędu ns, przy dużych natężeniach impulsu prądowego, rzędu kA.



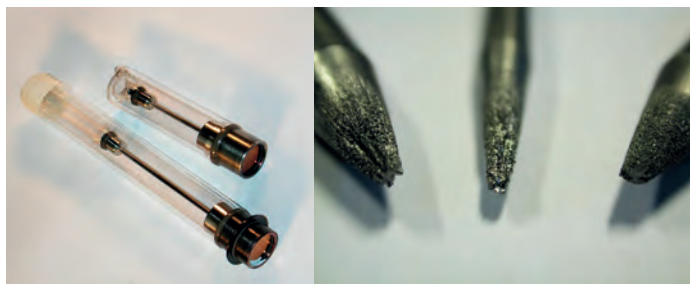
Ryc. 3 Lampa rentgenowska z gorącą katodą (typu Coolidge'a) oraz jej schemat
Źródło: [3].



Ryc. 4 Z lampą Coolidge'a SRT-4 (400 kV, 15 mA) w Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej oraz z lampą Lilienfelda w Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie
Źródło: Archiwum własne.



Ryc. 5 Dwa podstawowe układy impulsowej lampy z zimną emisją z anodą transmisyjną (lewy) i anodą odbiciową (prawy) A - anoda, K - katoda, e⁻ - elektrony, X - promieniowanie rentgenowskie
Źródło: [2].



Ryc. 6 a) Lampy impulsowe firmy L-3 Communications (USA); b) zużyte anody ostrzowe ze źródła otwartego firmy Scandiflash (Szwecja)
Źródło: Archiwum własne.

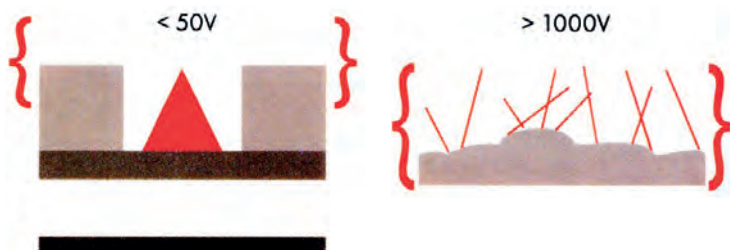
Lampy rentgenowskie z emiternem elektronów emisji polowej wykonanym w nanotechnologii – druga rewolucja w konstrukcji lamp rentgenowskich

Wykorzystując technologię MEMS (*Micro-Electrical-Mechanical-System*) amerykański wynalazca Charles A. Spindt w 1968 r. zespół ostrza emiternem z elektrodą ekstrakcyjną (zwaną dalej



bramką lub siatką) w jedną całość. Zastosowanie metody cienkich warstw do wykonania tej zintegrowanej wyrzutni umożliwiło zmniejszenie odległości emiter – bramka do wymiarów mikrometrowych. Dzięki temu niezbędne natężenie pola na katodzie dla uzyskania emisji polowej można było uzyskać przy potencjale bramki względem katody poniżej 100 V. Dodatkowo zwiększenie natężenia pola uzyskuje się przez wytworzenie katody o odpowiednim kształcie, możliwie małym promieniu krzywizny rzędu nanometrów i o możliwie małym kącie wierzchołkowym.

Układy MEMS wykorzystują jako materiał krzem ze względu na jego niezbyt wysoką cenę, dostępność i możliwość włączania funkcji elektronicznych. Układy te wytwarzane są przy użyciu różnych technik, takich jak: osadzanie, litografia i trawienie, wytwarzając grubości od 1 do 100 μm .



Ryc. 7 Dwa podstawowe rozwiązania źródeł elektronów z zimną emisją; z lewej mikrostrzałki metalowe, z prawej nanorurki węglowe (nad rysunkami podane są wymagane napięcia na bramce, są one znacznie wyższe dla CNT niż dla mikrostrzałki metalowej)
Źródło: [6].

Obecnie na świecie rozwijane są równolegle dwie technologie:

- z mikrostrzałkami metalowymi lub z krzemu oraz tlenków metali (np. ZnO),
- z nanorurkami: węglowymi (CNT – Carbon Nano Tube) czy tytanowymi (TiO_2).

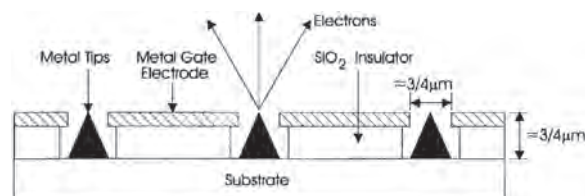
Zasadę działania obu tych rozwiązań przedstawiono na rycinie 7.

Do „wyrwania” elektronów niezbędne jest napięcie aktywacji przyłożone w niewielkiej odległości od mikrostrzałki metalowych lub nanorurek węglowych, co realizowane jest za pomocą zasilania odpowiedniej bramki. Sterowanie bramką umożliwia szybkie cyfrowe załączanie źródła elektronów (niezależnie od anody) w czasie rzędu mikrosekund; dla porównania lampy z termoemisją mogą być przełączone w milisekundach. Zimna emisja polowa wymaga generalnie, aby środowisko było stabilne, co wymaga ultrawysokiej próżni, tj. przynajmniej o rząd wyższej niż w lampach konwencjonalnych.

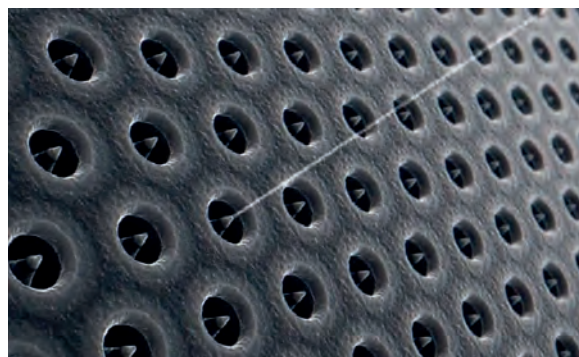
Podczas gdy elektrony termiczne (z gorącej katody) są emitowane w losowych kierunkach, elektrony zimne (z zimnej katody emisji polowej) są skierowane do przodu, ponadto mają wąski rozrzut energii, co razem sprzyja wytwarzaniu obrazów rentgenowskich o dużej rozdzielczości. Prąd anodowy i tym samym związane z nim natężenie promieniowania rentgenowskiego jest sterowany tylko przez napięcie siatki, niezależnie od napięcia anodowego i przełączany w mikrosekundach. Sam mechanizm przyspieszania elektronów padających na anodę pozostaje ten sam, co w lampach konwencjonalnych.

Źródła elektronów na bazie mikrostrzałki

Technologię wytwarzania emiterów na bazie mikrostrzałki metalowych wdrożyła izraelska firma Nanox. Emiter wykonany jest w postaci chipu FEA (Field Emission Array), który stanowi macierz około 100 mln nanostozków z molibdenu na powierzchni 1 cm^2 krzemu. Elektrony emitowane z każdego nanostozka uderzają w inne miejsce na anodzie, co utrzymuje anodę w korzystniejszych warunkach termicznych; nie ma np. potrzeby stosowania anody wirującej.

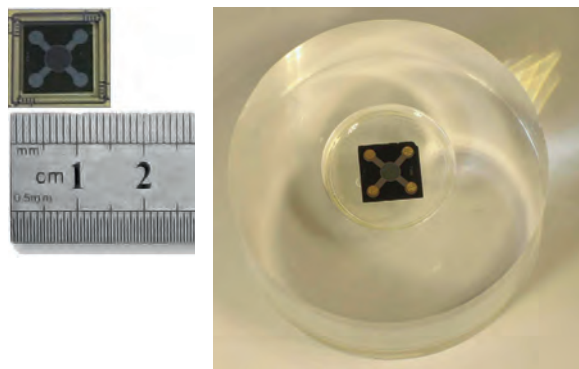


Ryc. 8 Przekrój emitera z mikrostrzałkami metalowymi (Gate oznacza siatkę, bramkę)
Źródło: [11].



Ryc. 9 Widok matrycy z mikrostrzałkami
Źródło: [6].

Zaletą tej technologii jest to, że możemy sterować emisją z dowolnych mikrostrzałki, uzyskując tym samym dowolny, zaprogramowany kształt ogniska.



Ryc. 10 Chip z mikrostrzałkami (źródło ma wymiar 2 mm x 2 mm) oraz eksponat z firmy Nanox w Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej
Źródło: Archiwum własne.



Źródła elektronów na bazie nanorurek węglowych

Nanorurki węglowe zsyntetyzowane po raz pierwszy w 1991 r.

są wyjątkowymi materiałami pod względem emisji polowej elektronów. Ich struktura składa się z pojedynczej warstwy atomów węgla formowanych jako grafen. Średnica nanorurki jest rzędu nanometrów (a więc dziesiątki tysięcy razy cieńsza od ludzkiego włosa, a ich długość może być miliony razy większa). Dzięki swej idealnej rurowej budowie nanorurki węglowe posiadają unikalne własności, w tym niejako automatycznie ostre końce i duży stosunek długości do średnicy (typowo **10 nm średnicy i 20–50 μm długości**). Tak więc zachowują się one jak malutkie dioda elektronowe; charakteryzują się niską pracą wyjścia elektronów (rzędu 1,2–2 eV), wysoką i stabilną emisją polową nawet w niskich temperaturach, doskonałą stabilnością chemiczną i termiczną.

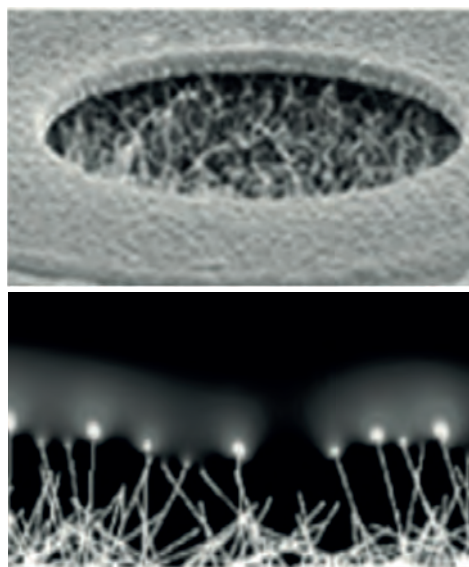
Pierwsze próby zbudowania miniaturowej lampy rentgenowskiej z emisją elektronów z CNT prowadzono z początkiem 2000 r. w amerykańskich firmach: *Xintek, Inc.*, *Moxtek*, jak również w *Oxford Instruments, Inc.* Ta ostatnia firma wprowadziła nawet tego typu lampę do komercyjnie produkowanego spektrometru fluorescencji rentgenowskiej Horizon600.



Ryc. 11 Przenośny analizator rentgenowski Horizon600 z lampą ze źródłem CNT
Źródło: [10].

Płaski emiter elektronów składa się z milionów takich mikroskopijnych nanorurek węglowych (Ryc. 12).

Australijska firma *Micro-X* opatentowała unikalne rozwiązanie bazujące na amorficznym materiale matrycowym, który wiąże nieidealne nanorurki węglowe z metalową płytką. Uzyskane tą metodą emitery CNT umożliwiają uzyskanie wysokiego prądu anodowego (130 mA przez 2 sekundy), co było dotąd głównym ograniczeniem stosowania CNT w lampach rentgenowskich do zastosowań medycznych, i zapewniają stabilną pracę przez cały okres eksploatacji lampy rentgenowskiej.



Ryc. 12 Widok nanorurek węglowych
Źródło: [6].



Ryc. 13 Emiter elektronów na bazie CNT firmy *Micro-X* Komercyjna lampa dla potrzeb medycyny ww. firmy (40–120 kV, 90 mAmax, maksymalny czas ekspozycji 1500 ms, ciągła moc anody 28 W, masa 2,35 kg)
Źródło: Archiwum własne.

Firma *Micro-X* gwarantuje czas pracy lampy – minimum 10 lat przy typowym użytkowaniu, tj. 60 zdjęć wykonywanych dziennie. Na przykład standardowe prześwietlenie klatki piersiowej przy 110 kV i 3,2 mA, z ogniskiem 1,4 mm to czas trwania impulsu 78 ms. Szacuje się, że czas użytkowania lamp ze źródłem CNT jest znacznie dłuższy niż lamp z gorącą katodą.

Aktualnie na świecie komercyjne lampy z emiterami CNT produkują następujące firmy: *Micro-X Ltd* (Australia), *VSI Medical* (Korea Południowa), *Luxbright* (Szwecja) – ta ostatnia w przygotowaniu.

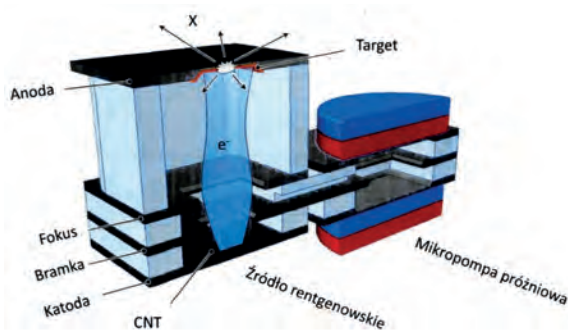


Ryc. 14 Lampy z CNT firmy VSI Medical: z lewej lampa o dużej dawce (50 kV, 50 mA, $\varnothing 20 \times 68$ mm), z prawej lampa do jonizatora (5-15 kV, 3-1,5 mA, $\varnothing 34 \times 34,35$ mm) Źródło: [7].

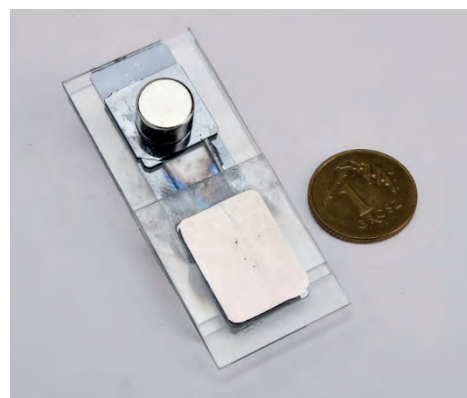
Polskie osiągnięcia w zakresie lamp rentgenowskich na nanorurkach

Na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej (Zakład Mikroinżynierii i Fotowoltaiki) od kilku już lat trwają prace pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Anny Góreckiej-Drzazgi nad wytworzeniem kompletnego punkowego źródła promieniowania rentgenowskiego. Przełomem w pracach było opracowanie pierwszych miniaturowych **pomp próżniowych** wykonanych technikami MEMS, które umożliwiają wytworzenie wysokiej próżni w samym źródle rentgenowskim.

Na rycinie 15 przedstawiono schemat takiego źródła, a na rycinie 16 jego rzeczywisty wygląd. Jak widać na rycinie, źródło takie zawiera zintegrowaną mikropompę próżniową. Całość wykonana jest z krzemu i szkła. Przewiduje się zbudowanie źródła o następujących parametrach: wysokie napięcie 30 kV, natężenie prądu 100 μ A, katoda CNT 1 mm \times 1 mm lub katoda punktowa krzemowa (pojedyncza piramidka), tarcza i okienko stanowi krzem o grubości 10–15 μ m.



Ryc. 15 Punktowe źródło promieniowania rentgenowskiego MEMS na nanorurkach węglowych Źródło: [8].



Ryc. 16 Rzeczywisty widok źródła wraz z pompą Źródło: Archiwum własne.

Podsumowanie

Lampy rentgenowskie z zimną emisją polową charakteryzują się wieloma zaletami w porównaniu z lampami konwencjonalnymi (z gorącą katodą). Mogą być łatwo sterowalne w czasie, mogą emitować promieniowanie rentgenowskie w krótkich czasach, posiadają małe ognisko optyczne oraz charakteryzują się małym zużyciem energii i małymi wymiarami zewnętrznymi oraz mniejszą masą.

Wydaje się, że nanorurki nadają się nie tylko jako źródło elektronów, ale także jako detektory promieniowania jonizującego. Otóż okazuje się, że nanorurki SnS (siarczek cyny) cechuje wysoki współczynnik absorpcji fotonów.

Opisana powyżej technologia przypomina przejście od żarówki Edisona na światło LED; jest to przejście od jednego metalowego włókna podgrzewanego (ok. 2300°C) do 100 mln nanostożków na chipie krzemowym emitującym cyfrowo w temperaturze pokojowej sterowany strumień elektronów.

Piśmiennictwo

1. Eine Erinnerung an C.H.F. Mller, Hamburg, 1990.
2. K. Besztak: *Impulsowe aparaty rentgenowskie*, IX Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Popów, 2007.
3. G. Jezierski: *100-lecie lampy rentgenowskiej*, XV Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Popów, 2013.
4. P. Russo: *Handbook of X-ray Imaging*, Physics and technology, CRC Press, 2018.
5. Dokumentacja techniczna firmy Micro-X (Australia).
6. Hot Cathodes, Cold Cathodes Nanox (Izrael).
7. VSI Medical.
8. Korespondencja z prof. Anną Górecką-Drzazgą, Zakład Mikroinżynierii i Fotowoltaiki, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej.
9. <https://www.crtsiste.com>
10. Spinoff 2003 – National Aeronautics & Space Administration – Google Książki.
11. https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-Spindt-type-gated-field-emitter-array_fig4_2985538