

DRUGA REWOLUCJA W KONSTRUKCJI LAMP RENTGENOWSKICH

The second revolution in the design of X-ray tubes

Grzegorz Jezierski

Streszczenie: W artykule przedstawiono najnowsze osiągnięcia w konstrukcji lamp rentgenowskich, które można określić drugą rewolucją. Mianowicie podstawowy problem jaki stwarzają dotychczasowe rozwiązania wynikające ze stosowania termicznego źródła elektronów (m.in. problem chłodzenia, sterowania pracą lampy) został rozwiązany poprzez wykorzystanie nanotechnologii do konstrukcji innowacyjnych źródeł elektronów w oparciu o emisję polową (nanorurki węglowe czy mikro-ostrza).

Abstract: The article presents the latest achievements in the design of X-ray tubes, which can be described as the second revolution. Namely, the basic problem posed by the current solutions resulting from the use of a thermal electron source (including the problem of cooling, tubes control) has been solved by using nanotechnology to construct innovative electron sources based on field emission (carbon nanotubes or micro-tips).

Słowa kluczowe: lampy wyładowcze, lampa rentgenowska Coolidge'a, źródło elektronów, termoemisja, emisja polowa, nanotechnologia MEMS, nanorurki węglowe, mikroostrza.

Keywords: discharge tubes, Coolidge X-ray tube, electron source, thermo-emission, field emission, MEMS, nanotechnology, carbon nanotubes, micro-tips

Wstęp

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 mikro-struktury. 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 uwidoczniać 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 zwartości 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
Table 1. Technical sources of X-ray radiation

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.

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

2. Lampy gazowane (jonowe) wytwarzające promieniowanie X

Jako że pierwsze lampy wyładowcze stosował angielski uczyony 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**.

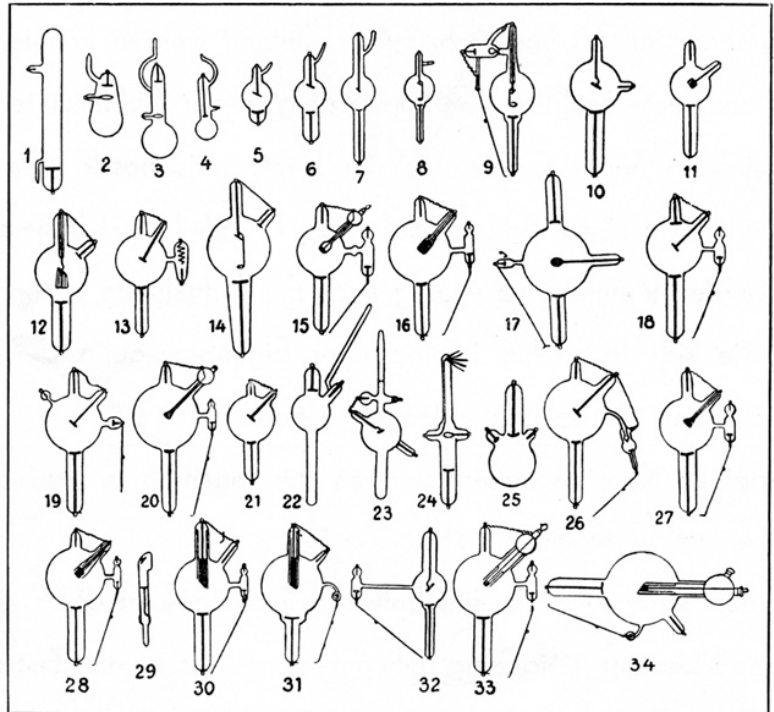
Obecność promieniowania kosmicznego powoduje, iż zawsze są obecne jakieś wolne elektrony oraz jony w lampie. Pod wpływem wysokiego napięcia dodatnie jony gazu, ulegały przyspieszeniu między elektrodami i bombardując katodę wyzwalały z niej elektrony. W związku z taką emisją elektronów, lampy te nazywano również lampami rentgenowskimi z zimną katodą. Z kolei uwolnione z katody elektrony, ulegając przyspieszeniu pod wpływem 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.



Fot. 1. Jonowa lampa do wytwarzania promieni X (ok.1910 r.) [9]
Photo 1. Ion tube for producing X rays (around 1910) [9]

Właściwe działanie pierwszych lamp rentgenowskich (gazowanych, czyli jonowych) zależało do obecności niewielkiej ilości gazu wewnątrz lampy. Jego ilość

² W polskiej nomenklaturze promienie X określamy jako promieniowanie rentgenowskie.



Müller-Röntgenröhren bis 1914

Rys. 1. Różnorodne konstrukcje wczesnych lamp do wytwarzania promieni X firmy C.H.F. Müller [1]

Fig. 1. Various designs of early X-ray tubes of C.H.F. Müller [1]

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; mówiło 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 „miękka”. Stąd też, aby zapewnić zadowalającą i jednolitą pracę lamp jonowych, próżnia powinna być utrzymywana na stałym w przybliżeniu poziomie. Na „twardość” czy „miękkość” lampy oprócz samego ciśnienia gazu miały wpływ 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 bardzo wiele rodzajów lamp rentgenowskich (gazowanych), eksperymentując z różnymi ich kształtami, rodzajami anod, jak i regulatorami próżni – rys. 1.

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 rentgenow-

szych 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.

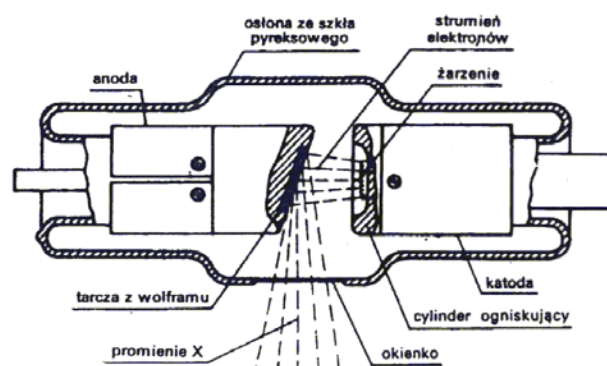
3. Właściwa lampa rentgenowska – pierwsza rewolucja w konstrukcji lamp rentgenowskich

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 umożliwiło niezależną regulację prądu anodowego i wysokiego napięcia dla sterowania promieniowaniem X. Zasadą 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 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 i jej 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 rys. 2.



Rys. 2. Lampa rentgenowska z gorącą katodą (typu Coolidge’a) oraz jej schemat

Fig. 2. X-ray tube with hot cathode (Coolidge type) and its diagram

Tabela 2. Porównanie lamp rentgenowskich

Table 2. Comparison of X-ray tubes

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 tarczę
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



Fot. 2. Z lampką Coolidge'a SRT-4 (400 kV, 15 mA) w Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej oraz z lampką Lilienfelda w Muzeum Marii Skłodowskiej-Curie w Warszawie

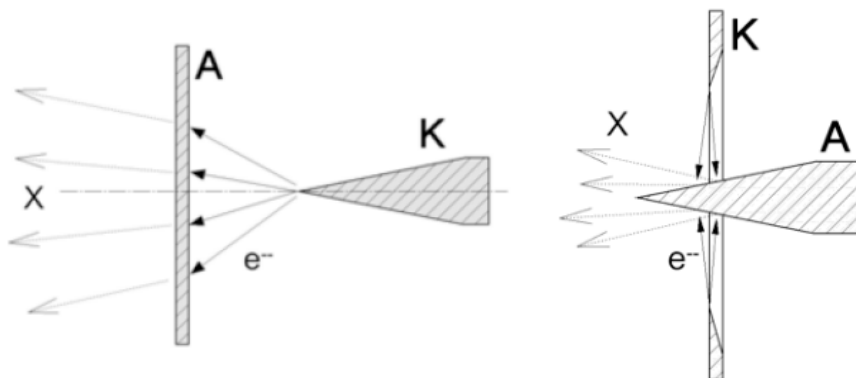
Photo 2. With the Coolidge SRT-4 tube (400 kV, 15 mA) at the Museum of X-ray Lamps of the Opole University of Technology and with the Lilienfeld tube at the Maria Skłodowska-Curie Museum in Warsaw

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.

4. 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. zespolił ostrza emitera 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 mikrometrycznych. 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,



Rys. 3. Dwa podstawowe układy impulsowej lampy z zimną emisją [2]; z anodą transmisyjną (lewy) i anodą odbiciową (prawy) A - anoda, K - katoda, e - elektrony, X - promieniowanie rentgenowskie
Fig. 3. Two basic circuits of pulsed lamp with cold emission [2]; with transmission anode (left) and reflection anode (right) A - anode, K - cathode, e - electrons, X - X-rays



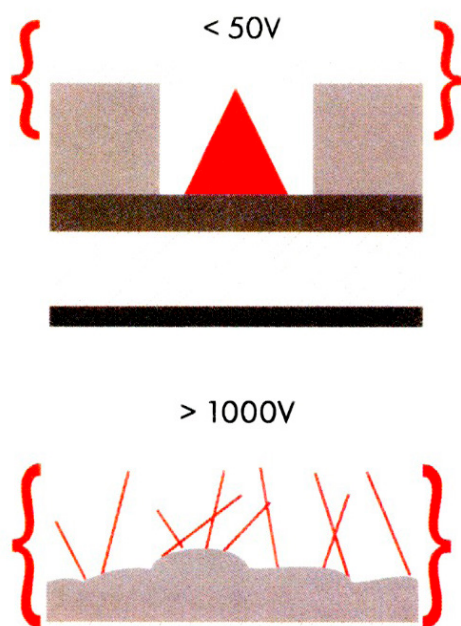
Fot. 3. a) Lampy impulsowe firmy L-3 Communications (USA) b) zużyte anody ostrzowe ze źródła otwartego firmy Scandiflash (Szwecja)
Photo 3. a) Pulse tubes by L-3 Communications (USA) b) used spike anodes from an open source company by Scandiflash (Sweden)

takich jak: osadzanie, litografia i trawienie, wytwarzając grubości od 1 do 100 μm .

Obecnie na świecie rozwijane są równolegle dwie technologie:

- z mikroostrzami metalowymi lub z krzemu oraz tlenków metali (np. ZnO),
- z nanorurkami: węglowymi (CNT – Carbon Nano Tube) czy tytanowymi (TiO₂).

Zasadę działania obu tych rozwiązań przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Dwa podstawowe rozwiązania źródeł elektronów z zimną emisją; z lewej mikroostrza metalowe, z prawej nanorurki węglowe (Nad rysunkami podane są wymagane napięcia na bramce, są one znacznie wyższe dla CNT niż dla mikroostrza metalowego)

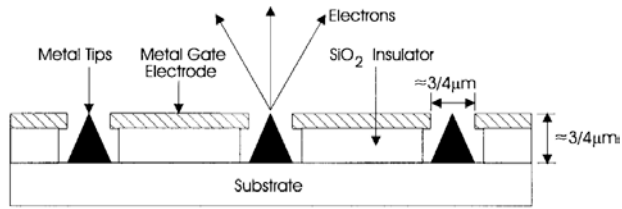
Fig. 4. Two basic solutions of cold emission electron sources; on the left metal micro-tips, on the right carbon nanotubes (Above the pictures are the required voltage on the gate, they are much higher for the CNT than for the metal micro-tips)

Do „wyrwania” elektronów niezbędne jest napięcie aktywacji, przyłożone w niewielkiej odległości od mikroostrzy metalowych lub nanorurek węglowych, co realizowane jest za pomocą zasilania odpowiedniej bramki. Sterowanie bramką umożliwia szybkie cyfrowe załączania 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.

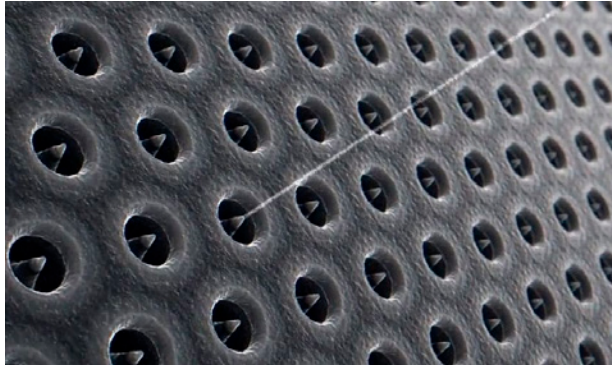
4.1. Źródła elektronów na bazie mikroostrzy

Technologię wytwarzania emiterów na bazie mikroostrzy 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 cm² 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.



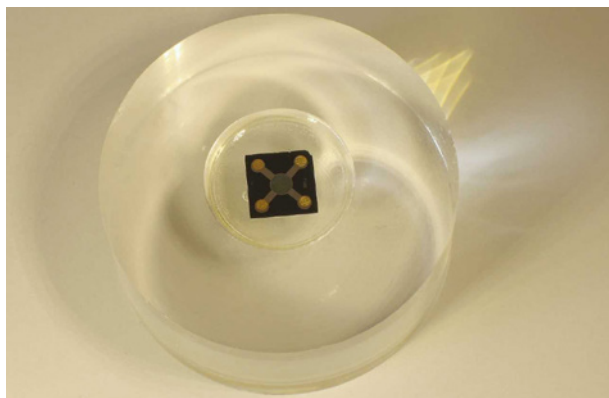
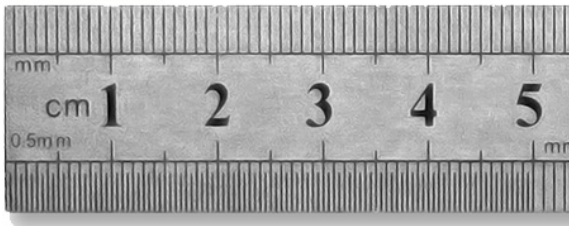
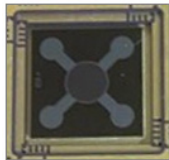
Rys. 5. Przekrój emitera z mikroostrzami metalowymi (Gate oznacza siatkę, bramkę)

Fig. 5. Cross-section of the emitter with metal micro-tips (Gate means a grid, a gate)



Fot. 4. Widok matrycy z mikroostrzami [6]

Photo 4. View of the matrix with micro-tips [6]



Fot. 5. Chip z mikroostrzami (źródło ma wymiar 2 mm × 2 mm) oraz eksponat z firmy Nanox w Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej

Photo 5. Chip with micro-tips (the source is 2 mm × 2 mm) and an exhibit from Nanox at the Museum of X-ray Tubes Opole University of Technology

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

4.2. Źródła elektronów na bazie nanorurek węglowych

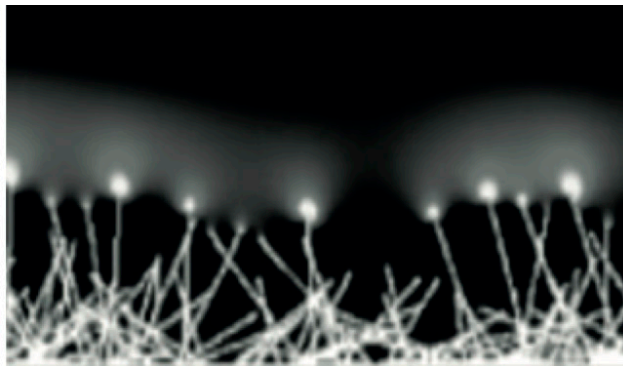
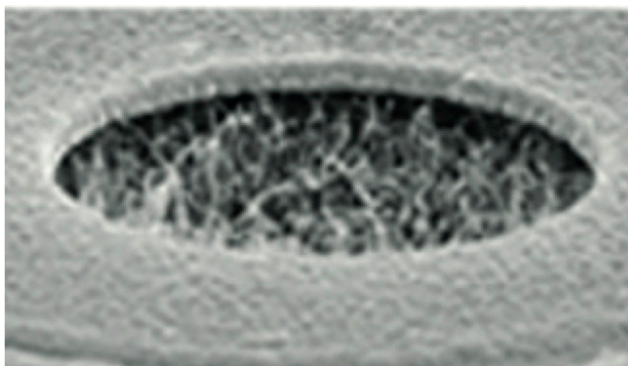
Nanorurki węglowe zsyntetyzowane po raz pierwszy w 1991 r. są wyjątkowymi materiałami pod względem emisji polowej elektronów. Ich struktura składa się z pojedynczej warstwy atomów węgla formowanych, jako grafen. Średnica nanorurki jest rzędu nanometrów (a więc dziesiątki tysięcy razy cieńsza od ludzkiego 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 działa 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.*



Fot. 6. Przenośny analizator rentgenowski Horizon600 z lampką ze źródłem CNT [10]

Photo 6. Horizon600 portable X-ray analyzer with a tube with a CNT source [10]



Fot. 7. Widok nanorurek węglowych [6]
Photo 7. View of carbon nanotubes [6]



Fot. 8. Emiter elektronów na bazie CNT firmy Micro-X. Komercyjna lampa dla potrzeb medycyny ww. firmy (40-120 kV, 90 mA_{max}, maksymalny czas ekspozycji 1500 ms, ciągła moc anody 28 W, masa 2,35 kg)
Photo 8. Electron emitter based on CNT by Micro-X Commercial lamp for the medical needs of the above-mentioned company (40-120 kV, 90 mA_{max}, maximum exposure time 1500 ms, continuous anode power 28 W, weight 2.35 kg)

Ta ostatnia firma wprowadziła nawet tego typu lampę do komercyjnie produkowanego spektrometru fluorescencji rentgenowskiej Horizon600.

Płaski emiter elektronów składa się z milionów takich mikroskopijnych nanorurek węglowych – fot. 7.

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.

Firma *Micro-X* gwarantuje czas pracy lampy – minimum 10 lat przy typowym użytkowaniu, tj. 60 zdjęć wykonywanych dziennie. Np. 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.

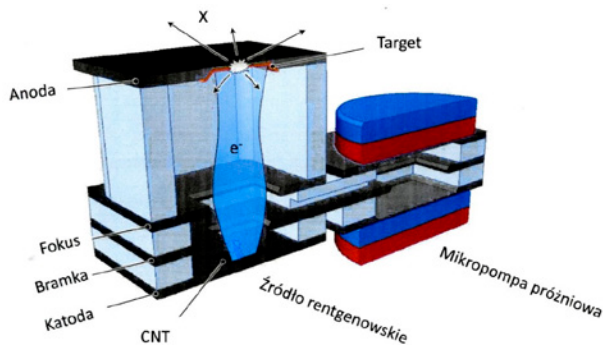


Fot. 9. Lampy z CNT firmy VSI Medical: z lewej lampa o dużej dawce (50 kV, 50 mA, Ø20×68 mm), z prawej lampa do jonizatora (5-15 kV, 3-1,5 mA, Ø34×34,35 mm)[7]
Photo 9. VSI Medical CNT tubes: on the left a high-dose lamp (50 kV, 50 mA, Ø20 × 68 mm), on the right, an ionizer lamp (5-15 kV, 3-1.5 mA, Ø34 × 34.35 mm) [7]

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

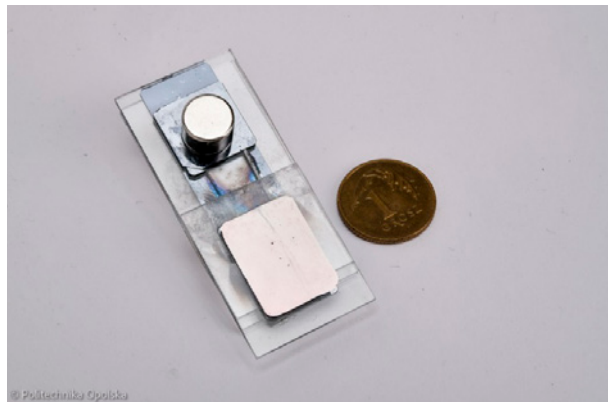
4.3. Polskie osiągnięcia w zakresie lamp rentgenowskich na nanorurkach

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.



Rys. 6. Punktowe źródło promieniowania rentgenowskiego MEMS na nanorurkach węglowych [8]

Fig. 6. Point MEMS X-ray source on carbon nanotubes [8]



Fot. 10. Rzeczywisty widok źródła wraz z pompką
Photo 10. The actual view of the source with the micro-pump

Na rys. 6 przedstawiono schemat takiego źródła a na fot. 10 jego rzeczywisty wygląd. Jak widać na rysunku 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.

5. Zakończenie

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 nanostozków na chipie krzemowym emitującym cyfrowo w temperaturze pokojowej sterowany strumień elektronów.

Rysunki i fotografie z archiwum Grzegorza Jezieskiego Muzeum Politechniki Opolskiej i Lamp Rentgenowskich

Grzegorz Jezieski,
Muzeum Politechniki Opolskiej
i Lamp Rentgenowskich,
Opole

Literatura:

- [1] Eine Erinnerung an C.H.F. Miller, Hamburg, 1990
- [2] K. Besztak „Impulsowe aparaty rentgenowskie” IX Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych, Popów-2007
- [3] G. Jezieski „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 r.
- [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