

## *Państwowy wzorzec jednostki miary długości jako przykład praktycznej realizacji metra*

Podobnie jak wiele innych nowatorskich rozwiązań, Rewolucja Francuska (1789 ÷ 1799) wprowadziła również po raz pierwszy system metryczny, jako system oparty na wzorcach metra i kilograma, stosujący zasadę 10-krotnych wielokrotności przy tworzeniu jednostek wtórnych. Wówczas to wykonano pierwsze, nazywane archiwalnymi, materialne wzorce metra i kilograma. Wzorzec metra stanowił pręt platynowy o przekroju prostokątnym, którego długość wyznaczona była przez odległość między płaszczyznami czołowymi i wynosiła jedną dziesięciomilionową ćwiartki południka ziemskiego przechodzącego przez Paryż. Niemal 100 lat później, w roku 1875, decyzją o powołaniu Międzynarodowej Konwencji Metrycznej, jej sygnatariusze postanowili założyć i utrzymywać Międzynarodowe Biuro Miar, którego jednym z zadań było wykonanie nowych prototypów metra i kilograma. Uchwałą Generalnej Konferencji Miar z 26 września 1889 roku, w ramach wprowadzonego Międzynarodowego Systemu Jednostek – SI, za definitywny prototyp metra uznano nowy wzorzec – tym razem kreskowy, w kształcie pręta o przekroju litery X, wykonany ze stopu platyny i irydu. Długość tego wzorca dobrana została tak, aby była jak najbardziej zbliżona do długości wzorca archiwalnego i wyrażona została jako mierzona w temperaturze 0°C odległość pomiędzy osiami dwóch głównych kres naciętych na wzorcu. Sam wzorzec przechowywany jest do dziś (obecnie jako historyczny) w Międzynarodowym Biurze Miar, a jego kopie wykonano dla wszystkich sygnatariuszy Konwencji Metrycznej.

Gwałtowny rozwój fizyki i techniki, który nastąpił w pierwszej połowie XX wieku wpłynął również na rozwój technik pomiarowych, w tym na powstanie szeregu stabilnych częstotliwościowo źródeł światła. Długość fali ich promieniowania, ściśle związana zależnością matematyczną z częstotliwością, w połączeniu z nowoczesnymi układami interferometrów umożliwia praktyczną realizację pomiarów długości. Doprowadziło to do przyjęcia przez 11. Generalną Konferencję Miar, w 1960 r., nowej definicji metra, która mówiła, że jednostkę tę stanowi odległość wyznaczona 1 650 763,73 długościami fal w próżni promieniowania emitowanego przez atomy kryptonu <sup>86</sup>Kr. W Głównym Urzędzie Miar zaczęto stosować tę definicję w praktycznych pomiarach już w 1966 r.

Rozwój techniki laserowej i nowe osiągnięcia w pomiarach częstotliwości optycznych otworzyły możliwość kolejnej redefinicji metra. W 1983 r. na 17. Generalnej Konferencji Miar (CGPM) jeden metr określono jako długość drogi przebytej w próżni przez światło w czasie 1/299 792 458 sekundy, a Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) ustalił rozszerzoną listę źródeł promieniowania świetlnego, zalecanych do praktycznej – „mise en pratique” – realizacji nowej definicji. Lista ta zawiera zarówno promieniowania różnego typu laserów, jak i lamp spektralnych, i jest sukcesywnie rozszerzana. Jako że nowa definicja metra nie wskazuje jasno na sposób wykonywania pomiarów długości, w szczególności długości małych i bardzo małych – rzędu pojedynczych metrów, centymetrów lub milimetrów, została ona uzupełniona przez CIPM o trzy metody praktycznej jej realizacji:

- 1) wykorzystując długość drogi  $l$ , którą płaska fala elektromagnetyczna przebywa w próżni w czasie  $t$ , wyznaczaną ze związku:  $l = c_0 \cdot t$ , gdzie  $c_0$  to prędkość światła w próżni równa

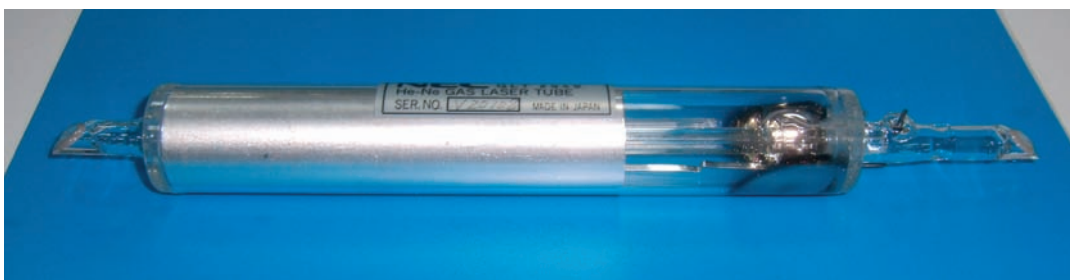
299 792 458 m/s. Metoda ta możliwa jest do zastosowania jedynie w pomiarach bardzo dużych odległości, np. odległości Ziemi od Księżyca.

- 2) wykorzystując długość  $\lambda$  płaskiej fali elektromagnetycznej w próżni o częstotliwości  $f$ , wyznaczaną ze związku:  $\lambda = c_0/f$ . Metoda ta opiera się na pomiarze częstotliwości stabilnego źródła światła poprzez porównanie jej ze znacznie stabilniejszą częstotliwością generatora cezowego, wykorzystywanego do praktycznej realizacji sekundy, a następnie wyznaczeniu z zależności matematycznej długości fali, która może być użyta jako wzorcowa w pomiarach długości.
- 3) wykorzystując promieniowania z listy zawartej we wspomnianym wcześniej zaleceniu CIPM, których podane długości fal lub częstotliwości mogą być użyte (wprost – bez żadnych pomiarów) wraz z przypisanymi im niepewnościami, pod warunkiem przestrzegania dodatkowych reguł dotyczących parametrów pracy stabilnego źródła światła.

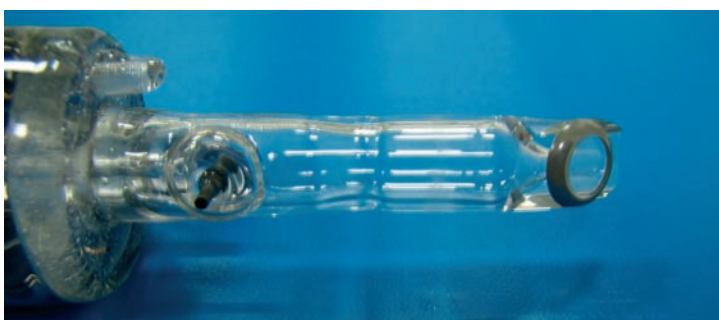
### *Państwowy wzorzec jednostki długości w Głównym Urzędzie Miar*

W Głównym Urzędzie Miar, zgodnie z trzecią metodą praktycznej realizacji definicji metra, na stanowisku państwowego wzorca jednostki długości, wykorzystywane jest wysoko stabilne promieniowanie lasera He-Ne stabilizowanego jodem. Stabilność względna tego lasera wynosi  $5 \cdot 10^{-11}$ . Stabilizacja częstotliwości promieniowania lasera oparta jest o zjawisko absorpcji i wymuszonej emisji przez molekuly jodu  $^{127}\text{I}_2$ , dla linii widmowej R(127). Poniżej przedstawiono jedne z głównych elementów lasera, któremu dla celów przeprowadzanych porównań międzynarodowych nadano nazwę GUM1.

Na rys. 1 przedstawiono laserową rurę wyladowczą wypełnioną mieszkanką gazów helu i neonu (He-Ne), zakończoną tzw. okienkami Brewstera (rys. 2), stosowanymi w celu obniżenia strat mocy promieniowania przy przechodzeniu światła przez szkło, a na

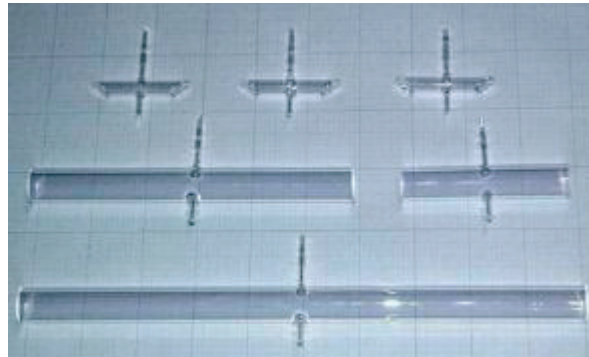


Rys. 1. Laserowa rura wyladowcza



Rys. 2. Okienko Brewstera

rys. 3 różne typy komórek jodowych, pełniących rolę dodatkowego filtra w stosunku do promieniowania emitowanego przez układ rezonatora składający się z rury wyładowczej i zwierciadeł.



Rys. 3. Komórki jodowe

Laser GUM1 składa się z dwóch bloków: części optycznej oraz zespołu elektroniki. Schemat blokowy lasera przedstawiono na rys. 4. Współdziałanie poszczególnych elementów lasera wraz z komórką jodową pozwala wygenerować promieniowanie z szeregiem stabilnych częstotliwości w zakresie długości fali w próżni około 633 nm, które odpowiadają strukturze subtelnej absorpcyjnej linii widmowej jodu  $^{127}\text{I}_2$  R(127). Stabilizacja częstotliwości oparta jest na wprowadzeniu wolnozmiennnej (ok. 1092 Hz) modulacji sygnału optycznego, a następnie demodulacji fazowej 3 harmonicznej tego sygnału po stronie odbiorczej i zastosowaniu stabilizacyjnej pętli sprzężenia zwrotnego PLL z wykonawczym elementem piezoelektrycznym.

Wspomniane wcześniej, konieczne do zapewnienia odpowiedniej stabilności częstotliwości, dodatkowe reguły dotyczą:

- ◆ parametrów komórki jodowej:
  - odpowiedniej czystości napełnienia komórki jodem,
  - temperatury ścianek komórki ( $25 \pm 5$ ) °C,
  - temperatury par jodu ( $15 \pm 0,2$ ) °C,
- ◆ głębokości modulacji częstotliwości ( $6 \pm 0,3$ ) MHz,
- ◆ mocy wewnątrz wnęki rezonansowej lasera, wynoszącej ( $10 \pm 5$ ) mW.

Najczęściej wykorzystywanymi częstotliwościami zalecanymi przez CIPM, oznaczonymi, zgodnie z podpoziomami struktury subtelnej widma promieniowania atomów, indeksami  $d, e, f, g$  są:

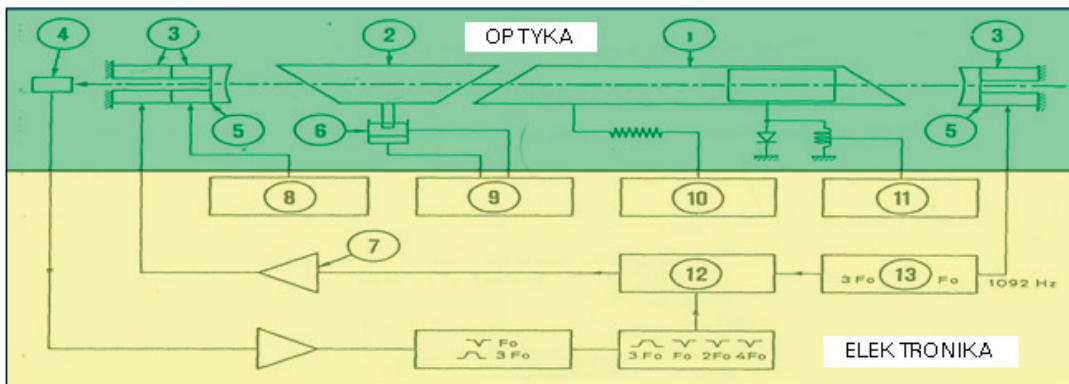
$$F_{wd} = 473\,612\,379,828 \text{ MHz}$$

$$F_{we} = 473\,612\,366,967 \text{ MHz}$$

$$F_{wf} = 473\,612\,353,604 \text{ MHz}$$

$$F_{wg} = 473\,612\,340,406 \text{ MHz}$$

$F_{wf}$  – częstotliwość odnosząca się do podpoziomu  $f$  (inaczej  $\alpha_{16}$ ), traktowana jako częstotliwość odniesienia dla pozostałych – zgodnie z Zaleceniem 1 (CI-2002) [Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards – International Report].



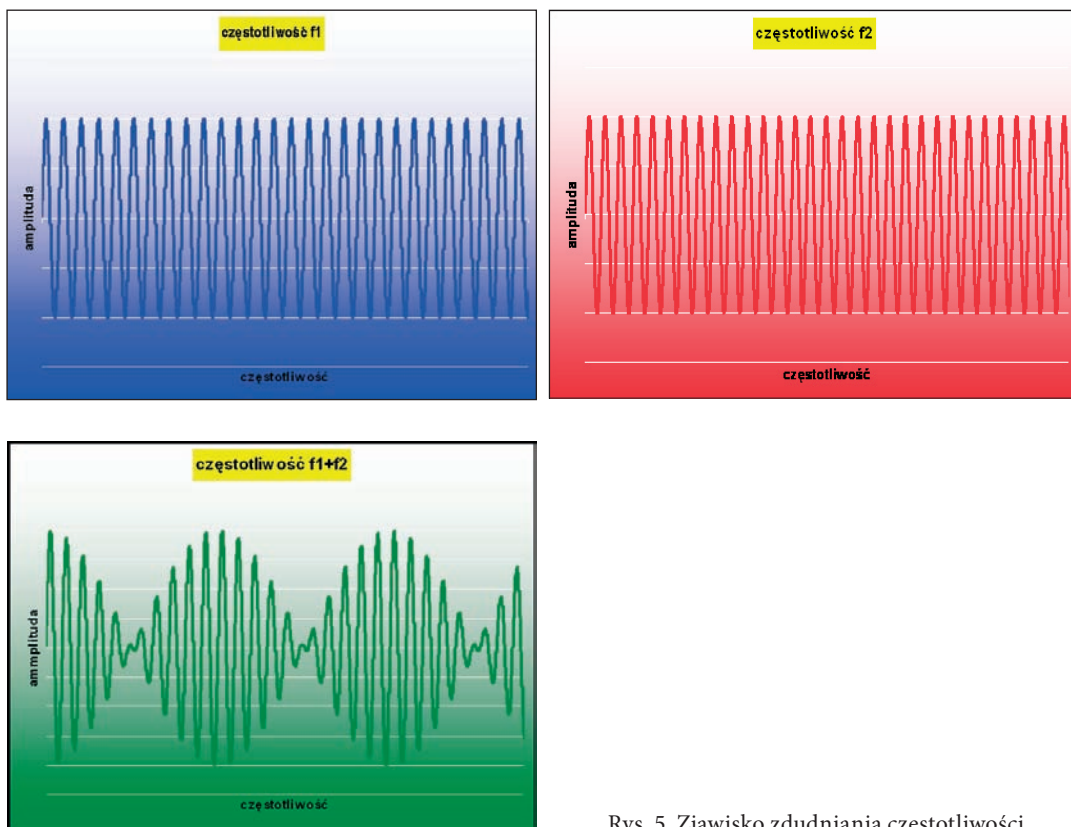
## y e j g

Do przekazywania jednostki długości (wyznaczania za pomocą częstotliwości lasera GUM1 częstotliwości innych laserów He-Ne) stosowane jest zjawisko zdudnienia optycznego wykorzystujące falowy charakter światła, występujące przy nałożeniu się dwóch promieni o bliskich sobie częstotliwościach. W wyniku takiego nałożenia powstaje sygnał zbiorczy o okresowych zmianach amplitudy, równych różnicy częstotliwości sygnałów składowych. W ten sposób obniżona częstotliwość, w odróżnieniu od częstotliwości (rzędu setek THz) promieniowania z widzialnego zakresu widma, może być zmierzona za pomocą dostępnych układów optoelektronicznych. Znając częstotliwość lasera wzorcowego i wyznaczoną na podstawie pomiaru częstotliwość dudnienia, możliwe jest wyznaczenie częstotliwości lasera badanego. Zjawisko dudnienia przedstawiono na rys. 5.

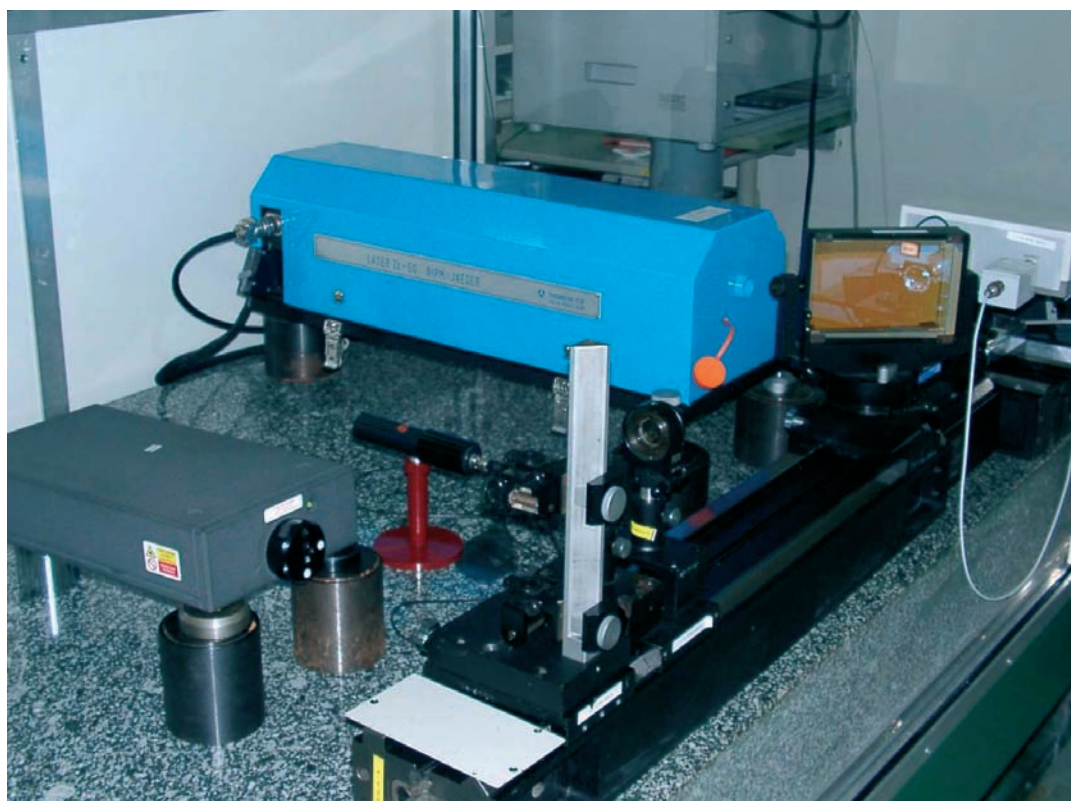
Zgodnie z powyższym częstotliwość promieniowania lasera badanego  $F_b$  określana jest z zależności:  $F_b = F_w - \Delta F$ , gdzie  $F_b$  – częstotliwość lasera badanego,  $F_w$  – częstotliwość lasera wzorcowego,  $\Delta F$  – zmierzona różnica częstotliwości.

Częstotliwość sygnału dudnienia mierzona jest częstotliwościomierzem i określana jest podczas pomiarów, kolejno dla czterech wspomnianych częstotliwości wzorcowych  $F_{wd}$ ,  $F_{we}$ ,  $F_{wf}$  oraz  $F_{wg}$  w celu określenia znaku różnicy częstotliwości  $\Delta F$ . Na rys. 6 przedstawiono widok stanowiska państwowego wzorca jednostki długości wraz z wzorcowym laserem jodowym GUM1, a na rys. 7 jego schemat blokowy.

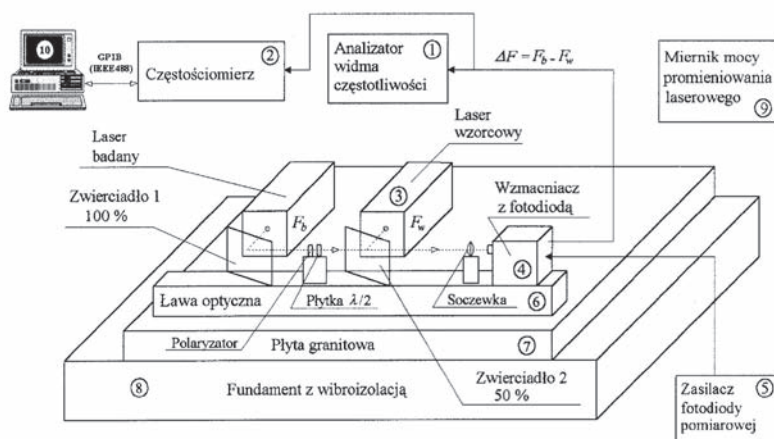
Dzięki zastosowaniu komputera z interfejsem GPIB (IEEE488), dane pomiarowe z częstotliwościomierza odpowiadające mierzonej różnicy częstotliwości  $\Delta F$  przesyłane są automatycznie do programu obliczeniowego. Program ten został napisany w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta i umożliwia wyznaczenie częstotliwości mierzonego lasera, jej stabilności w przedziale wielogodzinnym oraz obliczenie długości fali promieniowania w próżni.



Rys. 5. Zjawisko zdudniania częstotliwości



Rys. 6. Widok stanowiska państwowego wzorca jednostki długości GUM



Rys. 7. Schemat blokowy stanowiska państwowego wzorca jednostki długości GUM

## Podsumowanie

Obecne stanowisko państwowego wzorca jednostki długości posiadane przez GUM, między innymi ze względu na efekty związane z naturalnym starzeniem się jego elementów (17 lat użytkowania), a w szczególności efekt dyfuzji gazu przez szklane ścianki rury wyładowczej i zmianę jego składu, będzie musiało w najbliższym czasie być zastąpione nowym układem, uwzględniającym najnowsze osiągnięcia techniki w tej dziedzinie. Poza zaawansowanym wiekiem, posiadane stanowisko charakteryzuje się również innymi ograniczeniami. W celu skontrolowania poprawności jego pracy musi być ono porównywane ze stanowiskami innych krajowych instytucji metrologicznych (NMI), co wiąże się z określonymi kosztami. Ze względu na ograniczone możliwości pomiaru częstotliwości dudnienia stanowisko służyć może jedynie do wyznaczania częstotliwości laserów emitujących światło czerwone o długości fali 633 nm, a w ostatnich latach wzrasta potrzeba wzorcowania również źródeł emitujących światło zielone, pomarańczowe, żółte i w perspektywie kilku lat również niebieskie. Posiadany np. przez Zakład Długości i Kąta GUM interferometr do płytek wzorcowych, wyposażony w dwa lasery, z których jeden, emitujący światło o barwie zielonej i długości fali 543 nm wymaga corocznego wzorcowania w zagranicznym NMI. Koszt takiego wzorcowania, np. w NPL (Anglia) wynosi około 50 000 zł, a czas oczekiwania – 6 miesięcy.

Nowe, planowane stanowisko do odtwarzania jednostki długości to syntezer częstotliwości optycznych, zwany „femtosecond frequency comb”. Stanowi on zupełnie nową generację wzorców częstotliwości optycznych i daje możliwość bezpośredniego odniesienia generowanego sygnału do częstotliwości wzorcowego zegara cezowego, a przez to bezpośrednią, zgodną z definicją i zaleceniami CIPM, realizację jednostki długości (według wcześniej opisanej metody 2 – bezpośredniego pomiaru częstotliwości). W systemy takie wyposażyły się w ostatnich 4 latach między innymi: PTB – Niemcy, MIKES – Finlandia, BEV – Austria, METAS – Szwajcaria, CMI – Czechy, INRIM – Włochy, IPQ – Portugalia i LNE – Francja). Systemy takie gwarantują również, poprzez zastosowaną metodę syntezy częstotliwości, zmniejszenie niepewności pomiarów o dwa rzędy wielkości, co pozwala osiągnąć niepewność względną rzędu  $10^{-13}$ .

Zbigniew Ramotowski, Jerzy Walczuk