

Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości poprzez zastosowanie syntezy częstotliwości

Dariusz Czulek, Robert Szumski

Główny Urząd Miar, Zakład Długości i Kąta, Laboratorium Długości

W referacie omówiono definicje oraz metody praktycznej realizacji jednostki długości. Ponadto w referacie przedstawiono zmodernizowane stanowisko państwowego wzorca jednostki długości. W szczególności opisano budowę, zasadę działania oraz charakterystyki metrologiczne syntezy częstotliwości optycznych. W referacie przedstawiono również metodę obliczeniową oraz zaprezentowano wyniki przykładowych pomiarów przeprowadzonych na zmodernizowanym stanowisku państwowego wzorca jednostki długości.

Modernization of the national standard of length using frequency synthesizer

The definition and methods of the practical realization of the length unit are described. Moreover the modernized station of the national standard of length is discussed. Especially, the working principle of construction and metrological characteristics of the optical frequency synthesizer are presented. The calculational method and exemplary results of measurements with the use of the national standard of length are presented.

1. Wprowadzenie

Poznanie procesów kwantowych zachodzących w atomie pozwoliło na zbudowanie urządzeń do uzyskania spójnego, monochromatycznego światła poprzez jego wzmocnienie (generację) przy wykorzystaniu zjawiska wymuszonej emisji promieniowania, które zachodzi w kryształach, złączach i w gazach. Urządzenia takie, jak np. lasery, działają na zasadzie ww. emisji. Zasada działania lasera opiera się na fakcie, że układ, który wykazuje „ujemną absorpcję” może być wykorzystany jako wzmacniacz lub generator światła. Zatem działanie lasera jest wywołane tzw. akcją laserową polegającą na wzbudzeniu (najczęściej w wyniku pochłaniania promieniowania pochodzącego z obcego źródła, czyli tzw. pompy) niektórych atomów lub jonów odpowiedniej substancji do wyższego metastabilnego poziomu energetycznego. Proces ten nazywa się pompowaniem i pozwala na wyzwolenie energii w postaci kwantów spójnego promieniowania laserowego.

Rozwój techniki laserowej i nowe osiągnięcia w pomiarach częstotliwości optycznych otworzyły możliwość sformułowania nowej definicji 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 kwantowych źródeł promieniowania 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, została ona uzupełniona przez CIPM o trzy metody praktycznej jej realizacji:

- wykorzystując długość drogi l , którą płaska fala elektromagnetyczna przebywa w próżni w czasie t , wyznaczaną z zależności:

$$l = c_0 \cdot t \quad (1)$$

gdzie: t – mierzony czas, c_0 – prędkość światła w próżni równa 299 792 458 m/s,

- wykorzystując długość płaskiej fali elektromagnetycznej w próżni λ o częstotliwości f , wyznaczaną ze związku:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (2)$$

gdzie: f – mierzona częstotliwość, c_0 – prędkość światła w próżni równa 299 792 458 m/s,

- wykorzystując promieniowania z listy zawartej we wspomnianym wcześniej zaleceniu CIPM, których podane długości fal lub częstotliwości mogą być stosowane do praktycznej realizacji ww. definicji.

2. Państwowy wzorzec jednostki długości

W Głównym Urzędzie Miar, zgodnie z trzecią metodą praktycznej realizacji definicji metra, wykorzystywane jest wysoko stabilne promieniowanie lasera He-Ne stabilizowanego jodem „GUM1”. Stabilność względna tego lasera wynosi $5 \cdot 10^{-11}$. Stabilizacja częstotliwości promieniowania lasera oparta jest na zjawisku absorpcji i wymuszonej emisji przez molekuly jodu $^{127}\text{I}_2$, dla linii widmowej R(127). 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 trzeciej harmonicznej tego sygnału po stronie odbiorczej i zastosowaniu stabilizacyjnej pętli sprzężenia zwrotnego PLL (najczęściej stosowanej) z wykonawczym elementem piezoelektrycznym.

W roku 2007 w Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM dokonano modernizacji stanowiska państwowego wzorca jednostki długości. Modernizacja polegała na zakupie syntezerza częstotliwości optycznych, zwanego „femtosecond frequency comb”. Syntezer stanowi nową generację wzorców częstotliwości optycznych (nagroda Nobla dla prof. Theodora W. Hänscha z dziedziny fizyki kwantowej w 2005 r.).

Zmodernizowane stanowisko pomiarowe umożliwiło bezpośrednie odniesienie generowanego sygnału do częstotliwości wzorcowego zegara cezowego, a przez to bezpośrednią, zgodną z definicją i zaleceniami CIPM (metoda 2), realizację jednostki długości.

3. Budowa oraz zasada działania syntezerza częstotliwości optycznych

Układ pomiarowy, dzięki szerokiemu widmu (525 – 1070) nm, które składa się z linii o dokładnie znanych częstotliwościach, umożliwia wzorcowanie laserów emitujących promieniowanie optyczne o różnych długościach fal. Program komputerowy zapewnia pełną automatyzację oraz kontrolę stanowiska pomiarowego w trakcie trwania wzorcowania. Zsynchronizowanie stanowiska pomiarowego z wzorcowym sygnałem częstotliwości pozwala osiągnąć niepewność względną rzędu 10^{-13} .

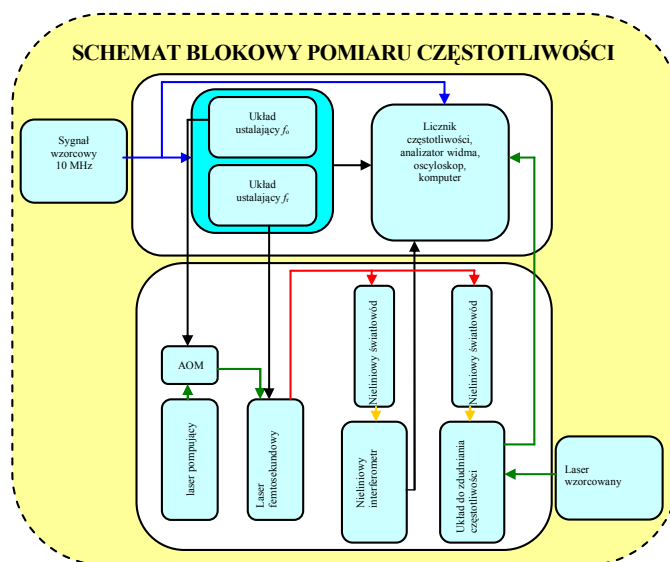
Syntezer częstotliwości optycznych składa się z dwóch podstawowych części: układu optyczno-mechanicznego oraz zespołu elektronicznego.

Układ optyczno-mechaniczny składa się lasera pompującego, modulatora amplitudy (AOM), lasera femtosekundowego (f_s), nieliniowych światłowodów, nieliniowego interferometru oraz układu pomiarowego służącego do zdudniania częstotliwości laserów wzorcowanych. Układ pomiarowy zapewnia kilka wyjść o różnych zakresach długości fal.

Układ elektroniczny składa się z analizatorów widma, oscyloskopu i licznika częstotliwości.

Połączenie układu optyczno-mechanicznego z elektroniką przyrządu pomiarowego umożliwiają fotodiody.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego.



Rys. 1. Schemat blokowy syntezy częstotliwości

4. Przekazywanie jednostki długości

Do przekazywania jednostki długości, tj. np. wzorcowania stabilizowanych laserów metrologicznych oraz głowic interferometrów laserowych stosowane jest zjawisko zdudnienia optycznego, wykorzystujące falowy charakter światła, występujące przy nałożeniu się dwóch sygnałów promieniowania o zbliżonych częstotliwościach.

Aby wyznaczyć częstotliwość promieniowania badanego źródła światła (w tym przypadku lasera) o wartości częstotliwości rzędu kilkuset THz (wartość bezpośrednio niemierzalna) wystarczy doprowadzić do zdudnienia sygnału optycznego mierzonego lasera z wzorcowym, dobrze znanym sygnałem innego, ale bardziej stabilnego generatora. Powstaje w ten sposób sygnał o mierzalnej częstotliwości równej różnicy częstotliwości lasera badanego i wzorcowego:

$$\Delta f = f_b - f_w \quad (3)$$

gdzie: Δf – różnica częstotliwości, f_b – częstotliwość lasera wzorcowanego, f_w – częstotliwość lasera wzorcowego.

Duża stabilność pracy syntezerów pozwala na wykonywanie badań długoterminowej stabilności częstotliwości (kilka – kilkanaście godzin) laserów metrologicznych oraz głowic interferometrów laserowych.

5. Podsumowanie

Z listy rekomendowanych źródeł promieniowania świetlnego najbardziej rozpowszechnione w praktyce realizacji jednostki długości są lasery gazowe He-Ne o długości fali promieniowania 633 nm i He-Ne o długości fali promieniowania 532 nm oraz lampy kadmowe ^{114}Cd (stosowane w pomiarach interferencyjnych), a obecnie najnowszym rozwiązaniem są syntezy częstotliwości optycznych.

Tendencja rozwoju nowych opracowań podąża w kierunku wykorzystania i rozpowszechnienia syntezerów częstotliwości w celu realizowania szerokiej gamy pomiarów wykorzystywanych w pracach badawczych instytucji metrologicznych, a dotyczących pomiarów kwantowych źródeł promieniowania oraz realizowania usług metrologicznych dla wielu dziedzin gospodarki, jak medycyna, wojsko, przemysł telekomunikacyjny, spektroskopia itp.

Modernizacja państwowego wzorca jednostki długości, czyli wdrożenie do pracy syntezerów częstotliwości optycznych pozwoliła na zwiększenie możliwości pomiarowych Laboratorium Długości Zakładu Długości i Kąta GUM. Stworzona została możliwość wykonywania długoterminowych badań laserów oraz głowic interferometrów laserowych. Dzięki szerokiemu zakresowi pomiarowemu możliwe jest wykonywanie w kraju wzorcowań laserów i diod emitujących promieniowanie świetlne o długościach fal w zakresie (525 ÷ 1070) nm oraz możliwym stało się wzorcowanie laserów stabilizowanych jodem „mise en pratique”, w tym lasera wzorcowego GUM1.