

METR

praktyczne aspekty realizacji definicji jednostki miary
długości – łańcuch spójności pomiarowej a użytkownicy
przyrządów pomiarowych

Robert Szumski, Dariusz Czutek

2019

Jednostka długości - metr

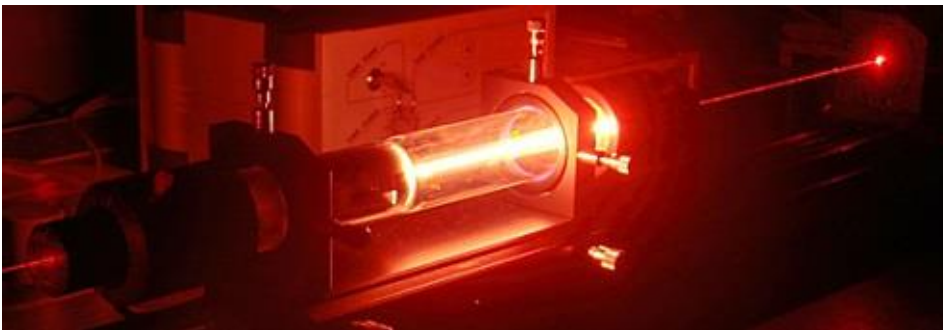
- (1795 - 1889) długość równa 10^{-7} długości mierzonej wzdłuż południka paryskiego od równika do bieguna. Na podstawie tej definicji wykonano z platyny wzorzec tzn. „metr archiwalny”.
- (1889 - 1960) I Generalna Konferencja Miar (1889); metr jest to odległość między odpowiednimi kreskami na wzorcu, równą $0,999914 \cdot 10^{-7}$ połowy południka ziemskiego tzn. „międzynarodowy prototyp metra”, wykonany ze stopu platyny i irydu, przechowywany w BIPM.



Jednostka długości - metr

- (1960 - 1983) XI Generalna Konferencja Miar (1960); metr jest to długość równa 1 659 763,73 długości fali promieniowania w próżni odpowiadającego przejściu między poziomami $2p^{10}$ a $5d^5$ atomu ^{86}Kr .
- XVII Generalna Konferencja Miar i Wag (1983); metr jest to odległość, jaką pokonuje światło w próżni w czasie $1/299\,792\,458$ s.

Znaczący postęp w metrologii wymiarowej po wynalezieniu lasera



Jednostka długości - metr

- 16 listopada 2018 r. – XXVI Generalna Konferencja Miar decyduje o innym zapisie definicji jednostki długości dla ujednoczenia brzmienia wszystkich jednostek SI.

Obecnie:

- **metr**, oznaczenie m, jest to jednostka SI długości. Jest ona zdefiniowana poprzez przyjęcie ustalonej wartości liczbowej prędkości światła w próżni c , wynoszącej 299 792 458, wyrażonej w jednostce m s^{-1} , przy czym sekunda zdefiniowana jest za pomocą częstotliwości cezowej $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

Metody praktycznej realizacji definicji metra (1)

Długość drogi l , którą płaska fala elektromagnetyczna przebywa w próżni w czasie t , wyznaczanej ze związku:

$$l = c_0 \cdot t$$

gdzie: t – mierzony czas, c_0 – prędkość światła w próżni równa 299792458 m/s

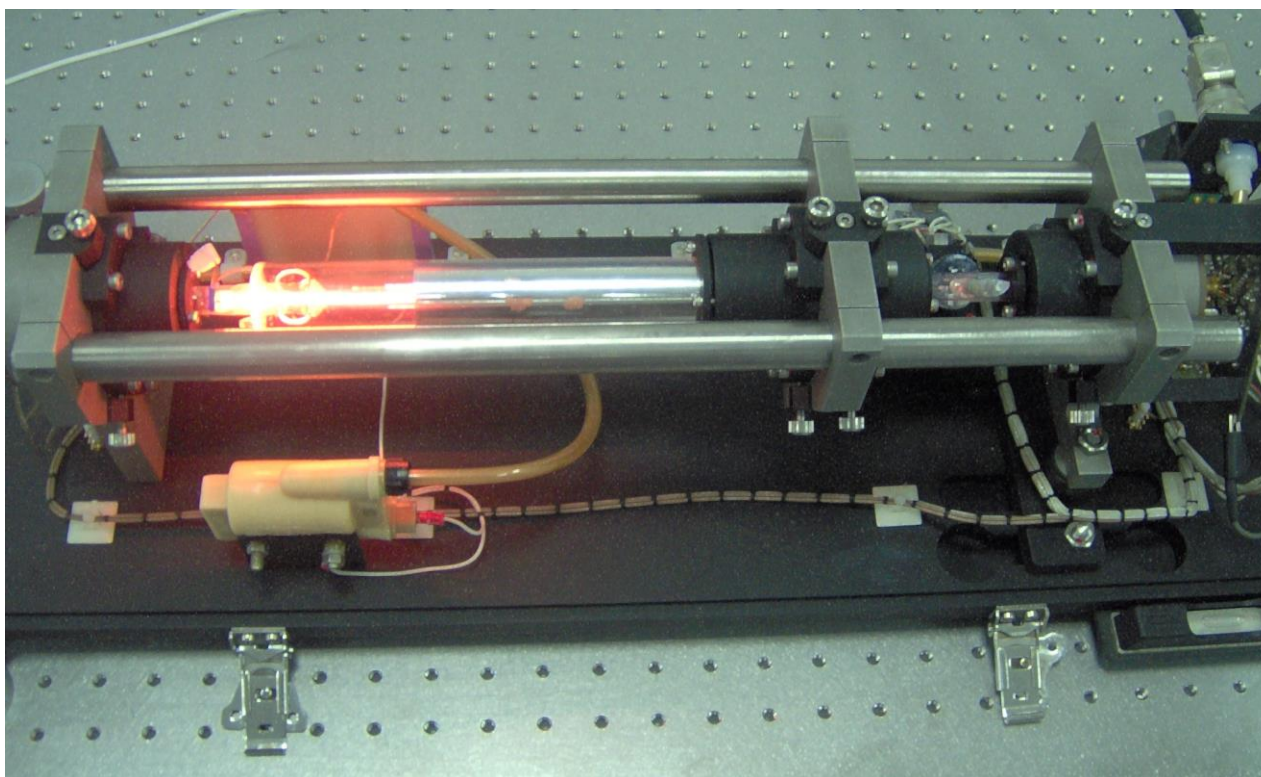
Metody praktycznej realizacji definicji metra (1)

Metoda ta możliwa jest do zastosowania w pomiarach dużych odległości, np. geodezyjnych lub odległości ziemi od księżyca.



Metody praktycznej realizacji definicji metra (2)

Wykorzystanie stabilnych źródeł promieniowania z listy zawartej w zaleceniu CIPM (zalecenie 2002 r.)



Wytyczne CIPM

- Lista zawiera ponad 40 pozycji z szerokiego zakresu długości fal promieniowania, w tym:
 - ✓ 532 nm – spektrum zielone,
 - ✓ 633 nm – spektrum czerwone,
 - ✓ 1542 nm – głęboka podczerwień.

- Najczęściej stosowane:
 - ✓ stabilizowane lasery z absorpcją molekuł jodu $^{127}\text{I}_2$ linia widmowa R(127); długość fali promieniowania ok. 633 nm – GUM1,
 - ✓ lampy spektralne kryptonowe, rtęciowe i kadmowe (^{86}Kr , ^{198}Hg oraz ^{114}Cd) - o długości fal promieniowania w zakresie (450÷650) nm stosowane bezpośrednio jako wzorce w interferencyjnych pomiarach długości.

Metody praktycznej realizacji definicji metra (3)

wykorzystanie długości l płaskiej fali elektromagnetycznej w próżni o częstotliwości f , wyznaczonej ze związku:

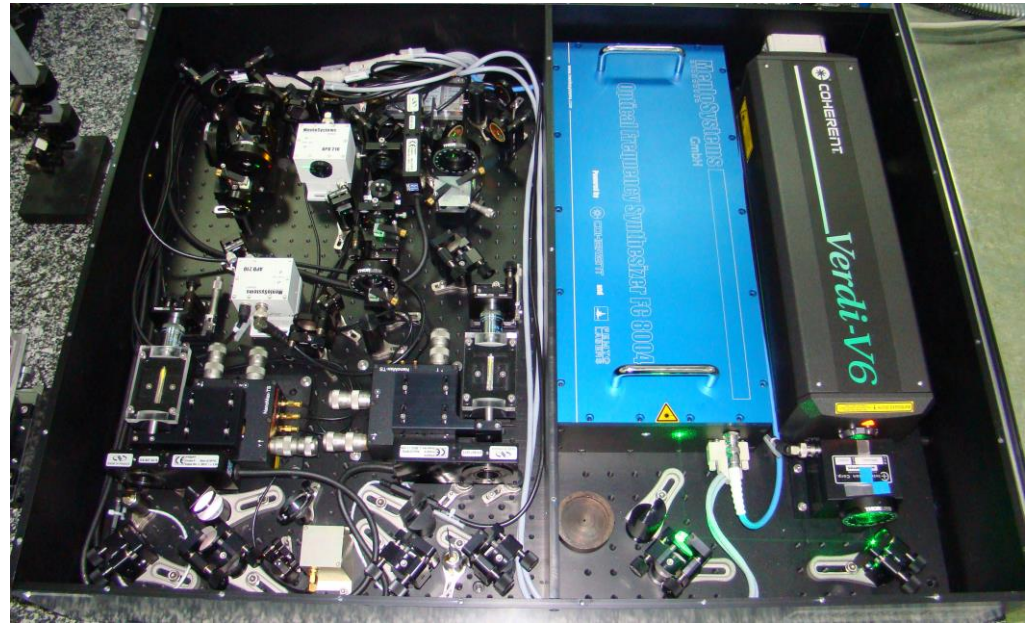
$$\lambda = \frac{c_0}{f}$$

gdzie: f – mierzona częstotliwość, c_0 – prędkość światła w próżni.

Metoda ta opiera się na pomiarze częstotliwości stabilnego źródła światła poprzez porównanie jej ze znacznie stabilniejszą częstotliwością generatora cezowego, wykorzystywanego w praktycznej realizacji definicji sekundy, a następnie wyznaczeniu z zależności matematycznej długości fali, która może być użyta jako wzorcowa w pomiarach długości

Syntezer częstotliwości optycznych

Nowa generacja wzorców częstotliwości optycznych (nagroda Nobla z dziedziny fizyki kwantowej):

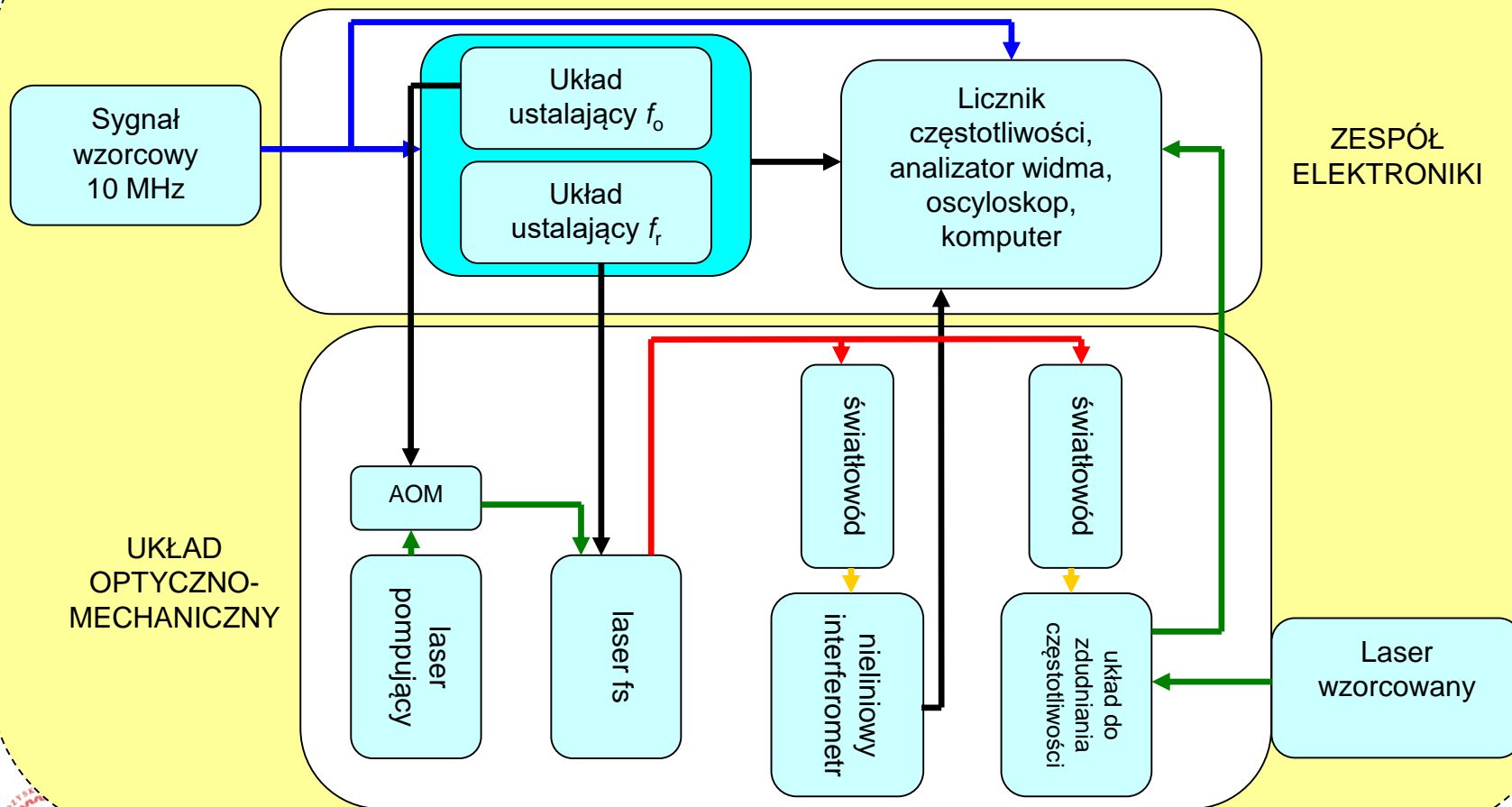


- ✓ bezpośrednie odniesienie generowanego sygnału do częstotliwości wzorcowego zegara cezowego,
- ✓ zgodna z definicją i zaleceniami CIPM realizacja jednostki długości.

Układ pomiarowy umożliwia, poprzez zastosowanie zjawiska zdudniania optycznego, wzorcowanie źródeł światła emitujących promieniowanie optyczne o długościach fal z zakresu **(525 ÷ 1070) nm**, z niepewnością względną pomiaru rzędu **10^{-13}** .

Syntezer częstotliwości FC 8004

SCHEMAT BLOKOWY POMIARU CZĘSTOTLIWOŚCI



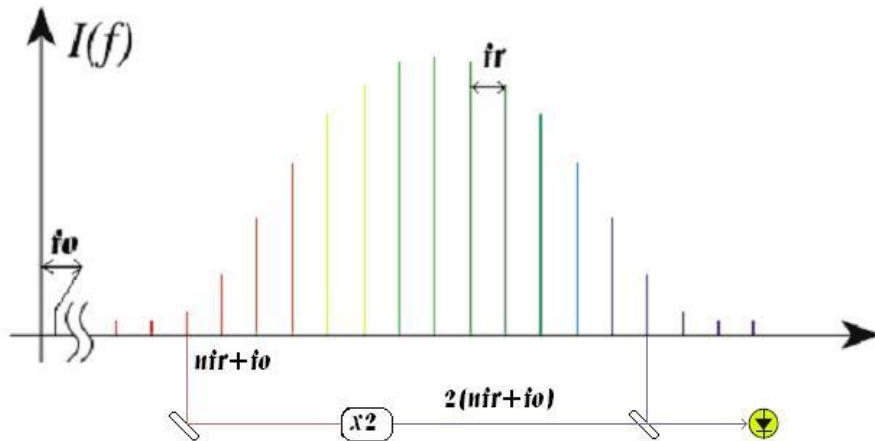
Syntezer częstotliwości FC 8004

Poprawną pracę optycznego syntezeru częstotliwości gwarantuje stabilizacja dwóch podstawowych parametrów:

- częstotliwości repetycji f_r ,
- częstotliwości offsetu f_o .

Dokładne wyznaczenie ich wartości umożliwia wyznaczenie wartości częstotliwości f_n dowolnego modu grzebienia częstotliwości z zależności:

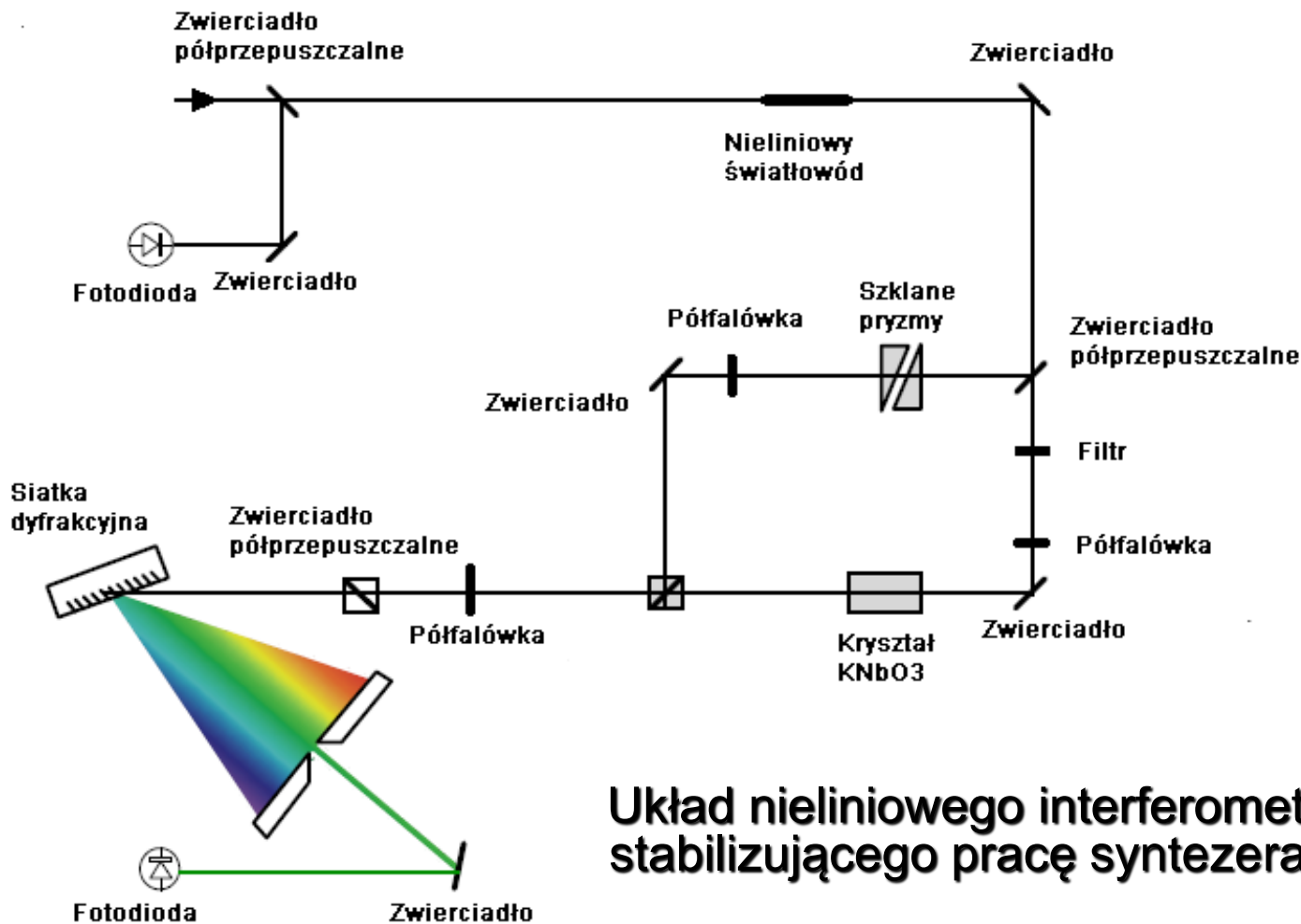
$$f_n = n \cdot f_r + f_o$$



Metoda stabilizowania częstotliwości f_r poprzez:

- pomiar częstotliwości repetycji lasera fs za pomocą szybkiej fotodiody typu PIN,
- synchronizację układu z generowanym sygnałem częstotliwości wzorcowego zegara cezowego.

Syntezer częstotliwości FC 8004

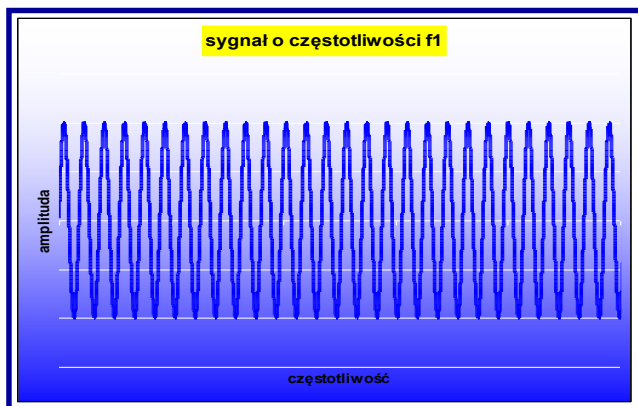


Układ nieliniowego interferometru stabilizującego pracę syntezer

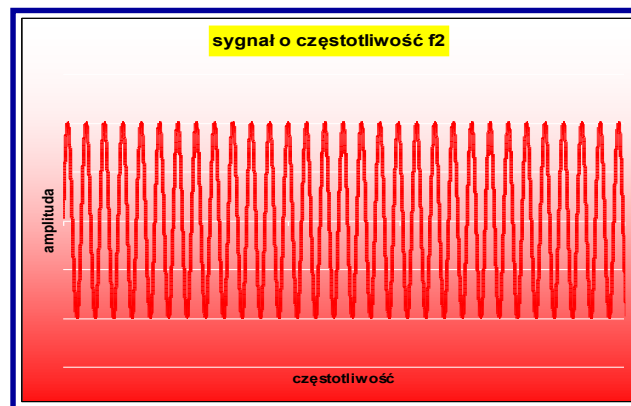
Zasada pomiaru – odtwarzanie i przekazywanie jednostki długości

Zjawisko zdudnienia optycznego

$$f_{CW}$$



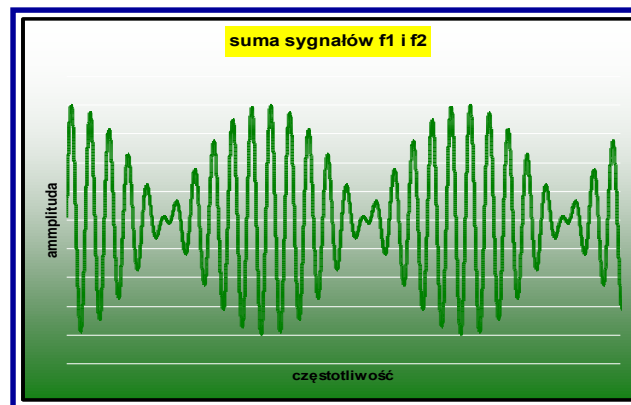
+



$$nf_{rep} \pm f_o$$

Częstotliwość promieniowania optycznego wzorcowanego źródła światła wyznaczana jest z następującej zależności:

$$f_{CW} = nf_{rep} \pm f_o \pm f_{beat}$$



$$f_{beat}$$

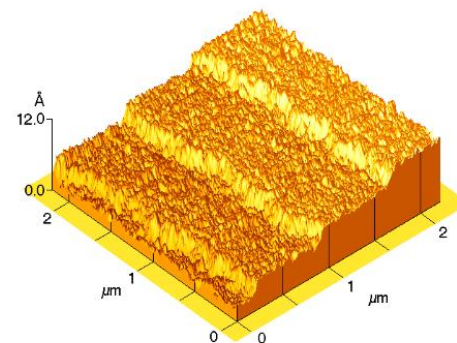
Wysoka stabilność pracy syntezyera pozwala na wykonywanie badań długoterminowej stabilności częstotliwości wzorców optycznych.

Metody praktycznej realizacji definicji metra (4)

Wykorzystanie odległości pomiędzy atomami w sieci krystalicznej krzemu – zaproponowane jako kierunek rozwoju podczas ostatniego spotkania Komitetu Doradczego Długości CIPM.

Przykładowe zastosowania to:

- stopniowe wzorce wysokości do wzorcowania w osi Z przyrządów ze skanującą sondą;
- lub wzorce w postaci sieci krzemowej do wyznaczania skali w transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM) o wysokiej rozdzielczości.



Stopnie jedno-atomowe na
krzemowej sieci krystalicznej

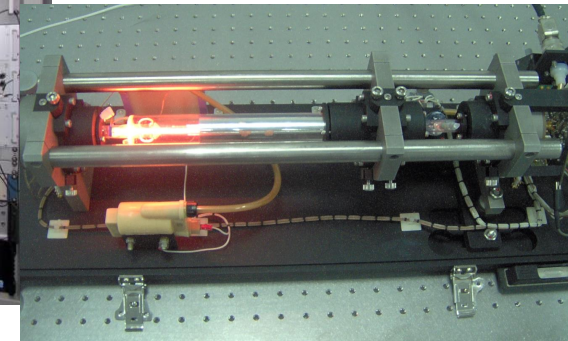
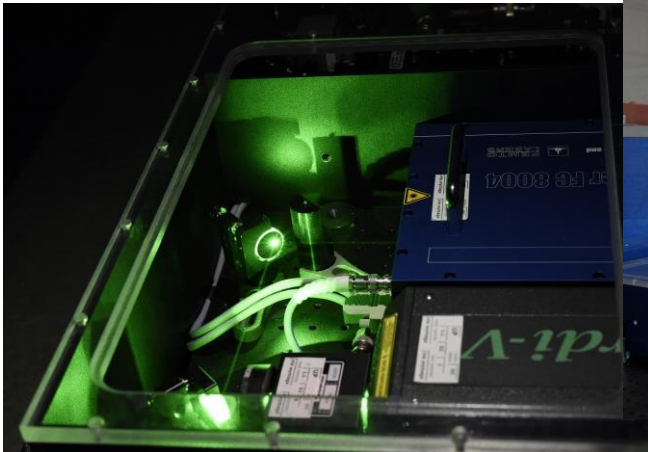
Spójność pomiarowa

Sygnal synchronizacyjny 10 MHz
z Państwowego Wzorca Jednostki
Czasu i Częstotliwości

Państwowy Wzorzec Jednostki Długości

Syntezer częstotliwości optycznych
FC8004

Laser helowo-neonowy
stabilizowany jodem



Spójność pomiarowa

Sygnal synchronizacyjny 10 MHz
z Państwowego Wzorca Jednostki
Czasu i Częstotliwości

Państwowy Wzorzec Jednostki Długości

Syntezer częstotliwości optycznych
FC8004

Laser helowo-neonowy
stabilizowany jodem

Stabilizowane lasery metrologiczne He-Ne
Główce interferometrów laserowych



Spójność pomiarowa

Sygnal synchronizacyjny 10 MHz
z Państwowego Wzorca Jednostki
Czasu i Częstotliwości

Państwowy Wzorzec Jednostki Długości

Syntezer częstotliwości optycznych
FC8004

Laser helowo-neonowy
stabilizowany jodem

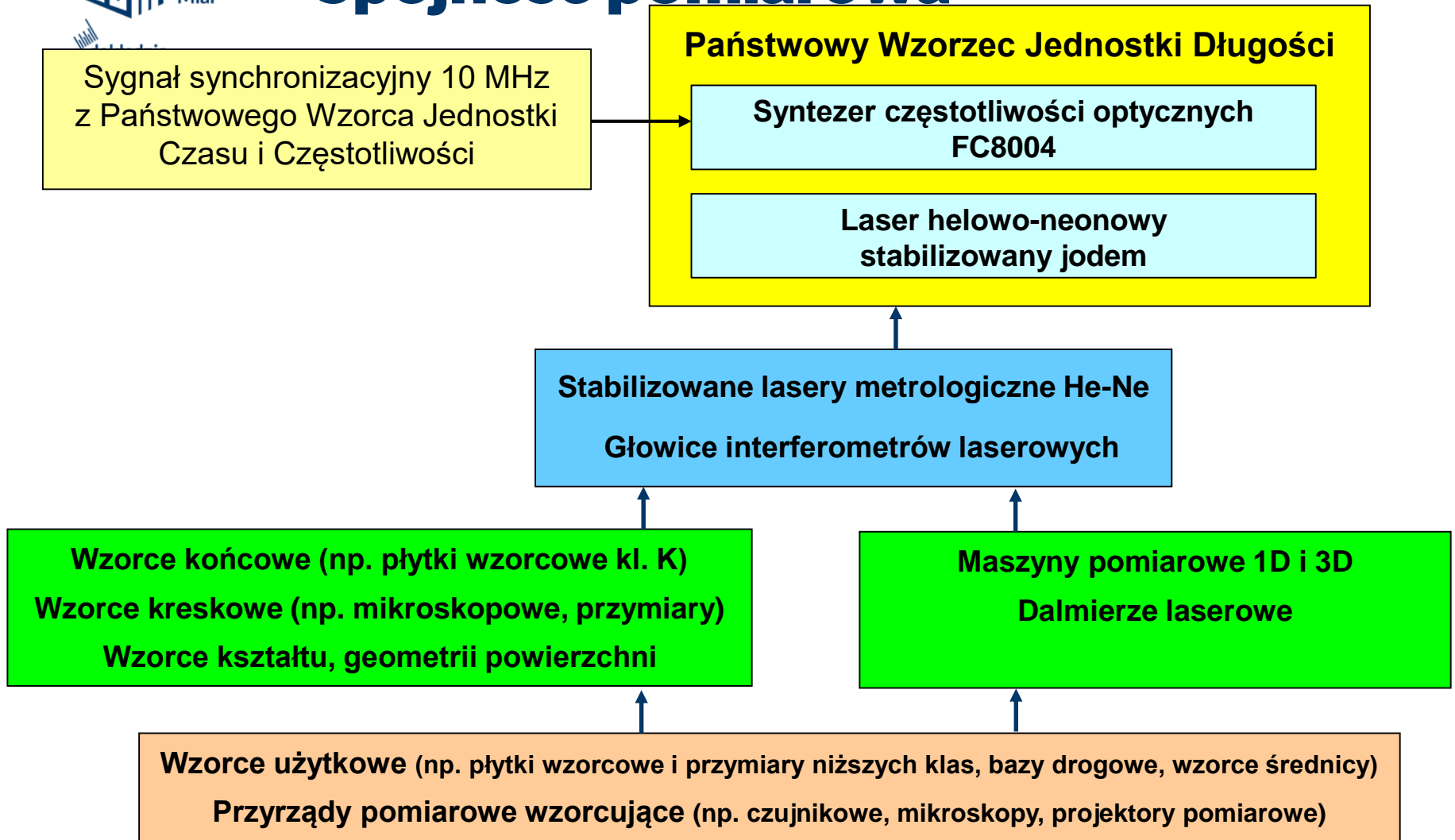
Stabilizowane lasery metrologiczne He-Ne
Główce interferometrów laserowych

Wzorce końcowe (np. płytki wzorcowe kl. K)
Wzorce kreskowe (np. mikroskopowe, przymiary)
Wzorce kształtu, geometrii powierzchni

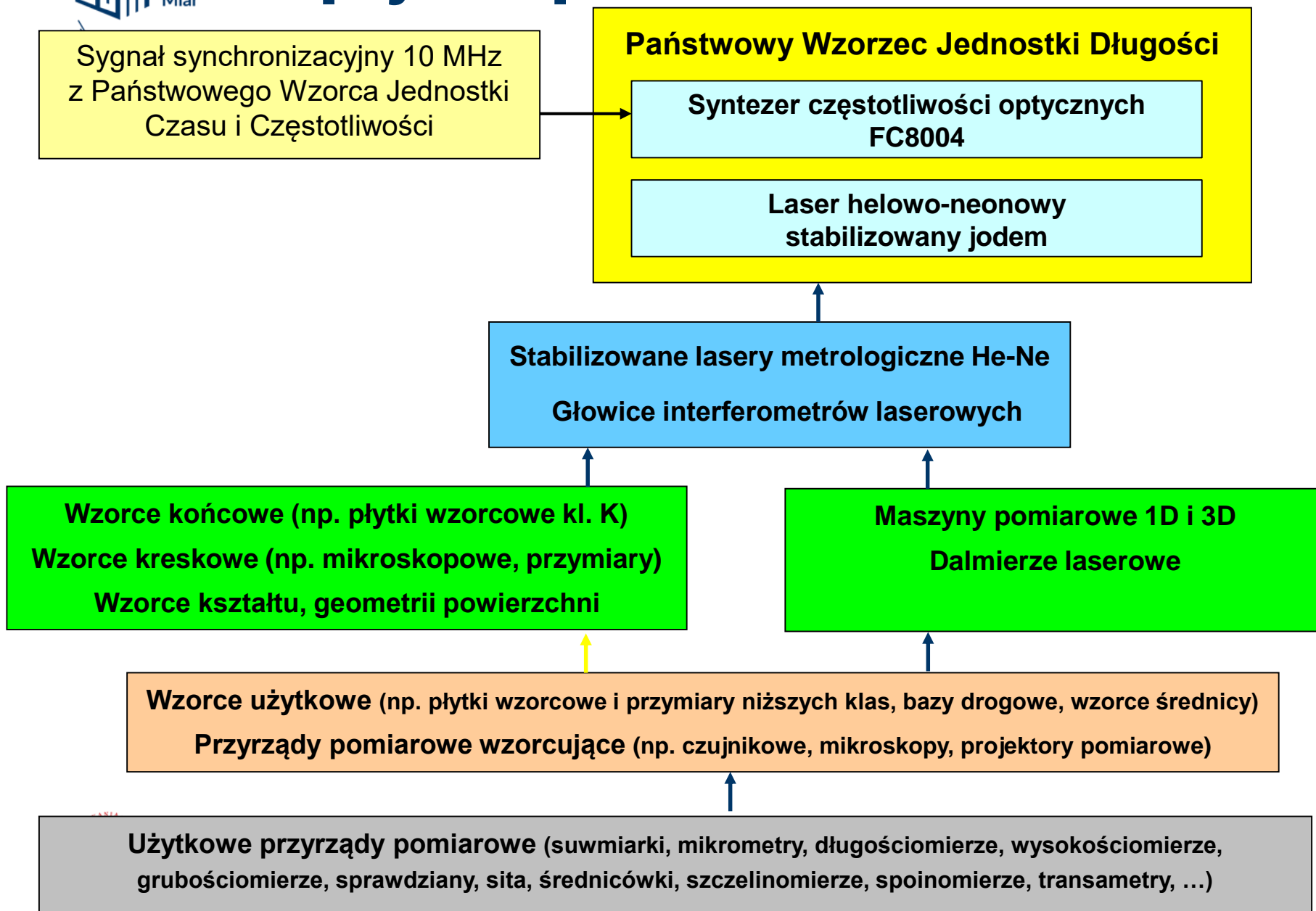
Maszyny pomiarowe 1D i 3D
Dalmierze laserowe



Spójność pomiarowa



Spójność pomiarowa



Dziękuję za uwagę