



NOVI NACIONALNI ETALON DUŽINE I OPTIČKIH FREKVENCIJA – KOMB GENERATOR

Slobodan Zelenika

Sektor za razvoj metrologije

Direkcija za mere i dragocene metale,

Mike Alasa 14, Beograd, Republika Srbija;

zelenika@dmdm.rs



DEFINICIJA METRA

Na 17. sastanku CGPM, održanom oktobra 1983. godine, usvojena je nova definicija jedinice dužine koja glasi:

Metar je dužina putanje koju u vakuumu pređe svetlost za vreme od $1/299\,792\,458$ sekundi.



PRAKTIČNA REALIZACIJA DEFINICIJA METRA - *MISE EN PRATIQUE*

- *Mise en Pratique* дефиниције физичке величине је скуп упутстава који омогућава практичну релизацију физичке јединице по дефиницији на највишем (primarnom) нивоу.
- Практична реализација јединице дужине према наведеној дефиницији остварује се у складу са Препоруком 1 (CI-1983) Међународног комитета за тегове и мере (CIPM), којом се одређује да се метар остварује једном од следећих метода:



PRAKTIČNA REALIZACIJA DEFINICIJA METRA - *MISE EN PRATIQUE*

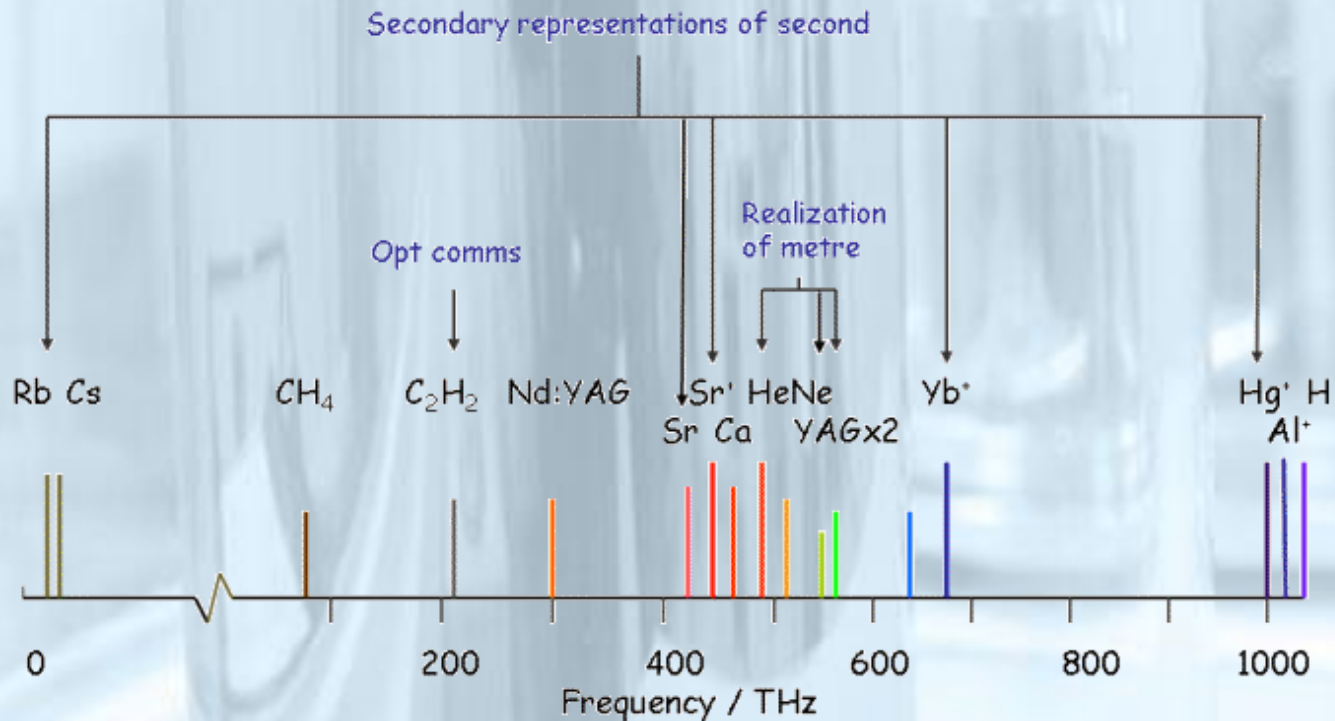
- pomoću dužine l putanje koju pređe u vakuumu ravan elektromagnetni talas u trajanju t ; ova dužina dobija se merenjem trajanja t , upotrebom odnosa $l = c_0 \cdot t$ i vrednosti za brzinu svetlosti u vakuumu $c_0 = 299\,792\,458$ m/s;
- pomoću talasne dužine λ u vakuumu ravnog elektromagnetnog talasa frekvencije f ; ova talasna dužina dobija se merenjem frekvencije f , upotrebom odnosa $\lambda = c_0/f$ i vrednosti za brzinu svetlosti u vakuumu $c_0 = 299\,792\,458$ m/s;
- pomoću jednog od zračenja sa date liste zračenja za koja može da se koristi data vrednost talasne dužine u vakuumu, odnosno data vrednost frekvencije, sa datom mernom nesigurnošću, samo ako se pridržava propisanih uslova i odgovarajućeg operativnog postupka.

U datoj listi preporučenih zračenja, vrednosti frekvencije i talasne dužine u vakuumu istog zračenja treba da su tačno povezane odnosom $\lambda \cdot f = c_0$.



PRAKTIČNA REALIZACIJA DEFINICIJA METRA - *MISE EN PRATIQUE*

- 1983. godine, lista preporučenih zračenja sadržavala je 5 preporučenih vrednosti frekvencije (talasne dužine) koje su praktično ostvarene pomoću zračenja frekvencijski stabilisanih lasera, Ova lista je nekoliko puta revidirana i dopunjavana i sada sadrži oko 20 preporučenih zračenja u rasponu frkvencije zračenja od ultraljubičastog do infracrvenog dela spektra





FREKVENCIJSKI STABILISANI LASERI - *MISE EN PRATIQUE*

IODINE ($\lambda \approx 633$ nm)

Absorbing molecule $^{127}\text{I}_2$, a^{16} or f component, R(127) 11-5 transition

1. CIPM recommended values

The values $f = 473\,612\,353\,604$ kHz

$\lambda = 632\,991\,212.58$ fm

with a relative standard uncertainty of 2.1×10^{-11} apply to the radiation of a He-Ne laser with an internal iodine cell, stabilized using the third harmonic detection technique, subject to the conditions:

cell-wall temperature (25 ± 5) °C ⁽²⁾;

cold-finger temperature (15.0 ± 0.2) °C;

frequency modulation width, peak-to-peak, (6.0 ± 0.3) MHz;

one-way intracavity beam power (i.e. the output power divided by the transmittance of thoutput mirror) (10 ± 5) mW for an absolute value of the power shift coefficient ≤ 1.0 kHz/mW.



FREKVENCIJSKI STABILISANI LASERI - MISE EN PRATIQUE

- These conditions are by themselves insufficient to ensure that the stated standard uncertainty will be achieved. It is also necessary for the optical and electronic control systems to be operating with the appropriate technical performance. The iodine cell may also be operated under relaxed conditions, leading to the larger uncertainty

Adopted value: $f = 473\,612\,353\,604\,(10)\text{ kHz}$

$$u^c/y = 2.1 \times 10^{-11}$$

for which: $\lambda = 632\,991\,212.579\,(13)\text{ fm}$

$$u^c/y = 2.1 \times 10^{-11}$$



FREKVENCIJSKI STABILISANI LASERI - MISE EN PRATIQUE

The uncertainties resulting from variations in operational parameters are listed below.

Parameter	Recommended value	Tolerance	Coefficient	u / kHz
Iodine cell				
cell-wall temperature	25 °C	5 °C	0.5 kHz/°C	2.5
cold-finger temperature	15 °C	0.2 °C	-15 kHz/°C	3.0
iodine purity	5.0			
Frequency modulation				
width peak-to-peak	6 MHz	0.3 MHz	-10 kHz / MHz	3.0
One-way intracavity				
beam power	10 mW	5 mW	≤ 1.0 kHz / mW	5.0
Beat-frequency measurements between two lasers				5.0
Combined standard uncertainty				$u^c = 10.0$ kHz



FREKVENCIJSKI STABILISANI LASERI - MISE EN PRATIQUE

Table 1

$\lambda \approx 633 \text{ nm}$ $^{127}\text{I}^2 \text{R}(127) \text{ 11-5}$

a^n	x	$[f(a^n) - f(a^{16})]/\text{MHz}$	u^c/MHz	a^n	x	$[f(a^n) - f(a^{16})]/\text{MHz}$	u^c/MHz
a^2	t	-721.8	0.5	a^{12}	j	-160.457	0.005
a^3	s	-697.8	0.5	a^{13}	i	-138.892	0.005
a^4	r	-459.62	0.01	a^{14}	h	-116.953	0.005
a^5	q	-431.58	0.05	a^{15}	g	-13.198	0.005
a^6	p	-429.18	0.05	a^{16}	f	0	—
a^7	o	-402.09	0.01	a^{17}	e	13.363	0.005
a^8	n	-301.706	0.005	a^{18}	d	26.224	0.005
a^9	m	-292.693	0.005	a^{19}	c	144.114	0.005
a^{10}	l	-276.886	0.005	a^{20}	b	152.208	0.005
a^{11}	k	-268.842	0.005	a^{21}	a	161.039	0.005

Frequency referenced to

$a^{16}(f)$, R(127) 11-5, $^{127}\text{I}^2$: $f = 473\,612\,353\,604 \text{ kHz}$



DIREKTNO MERENJE APSOLUTNE FREKVENCIJЕ – FREKVENCIJSKI LANCI

Direktno merenje apsolutne frekvencije u optičkom delu spektra je veoma komplikovan i zahtevan proces. Sve do nedavno, mogućnost apsolutnog merenja optičkih frekvencija imalo je samo nekoliko NMI u svetu koji su uspeali da izgrade kompleksne i skupe merne sisteme koji se zovu frekvencijski lanci (frequency chains). Ovi merni sistemi povezuju frekvencije zračenja atomskih časovnika (koje se nalaze u mikrotalasnom delu spektra) sa optičkim frekvencijama laserskog zračenja. Direktnim merenjem apsolutne frekvencije zračenja lasera pomoću frekvencijskog lanca, etalon dužine i optičkih frekvencija (laser) ima direktnu sledivost do etalona jedinice vremena

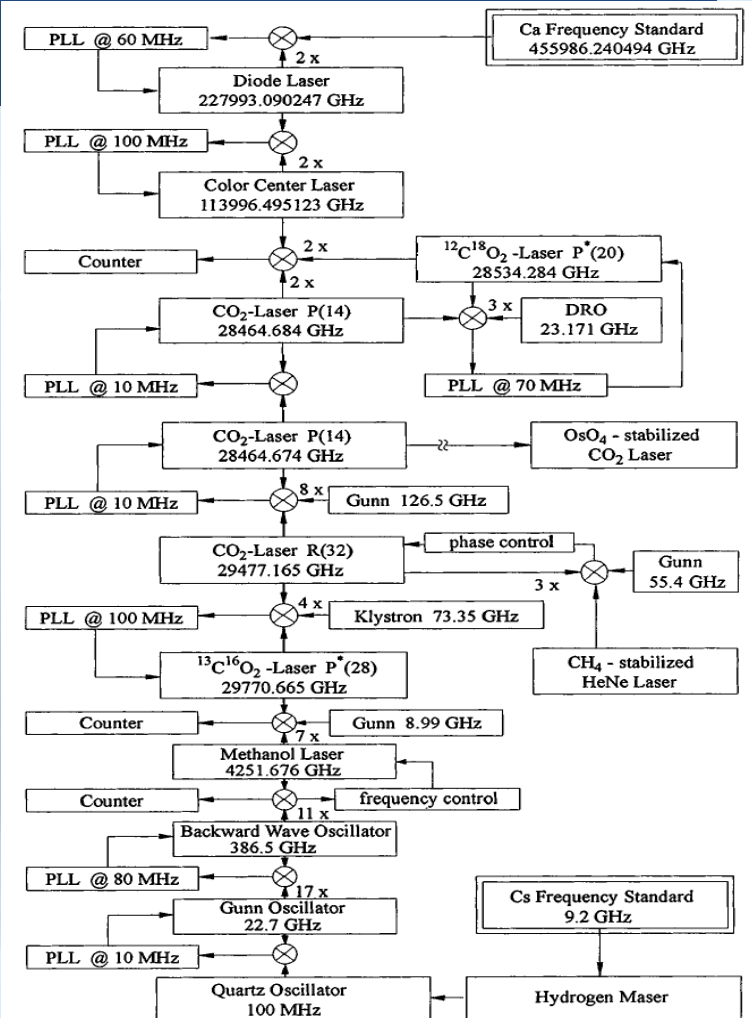
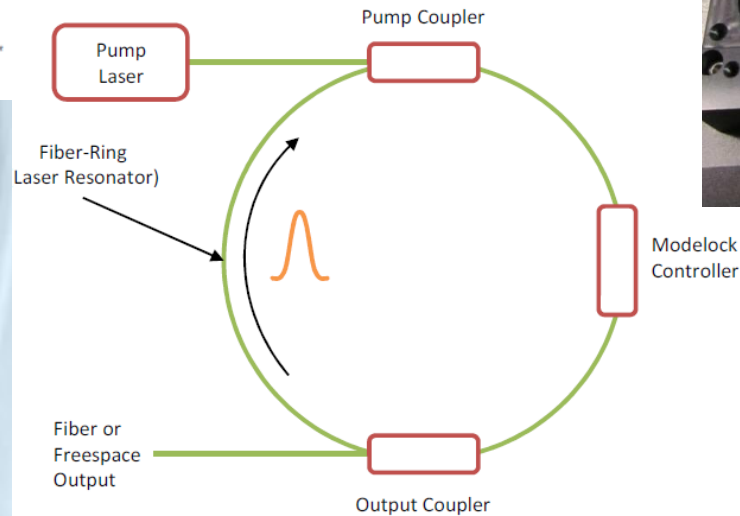
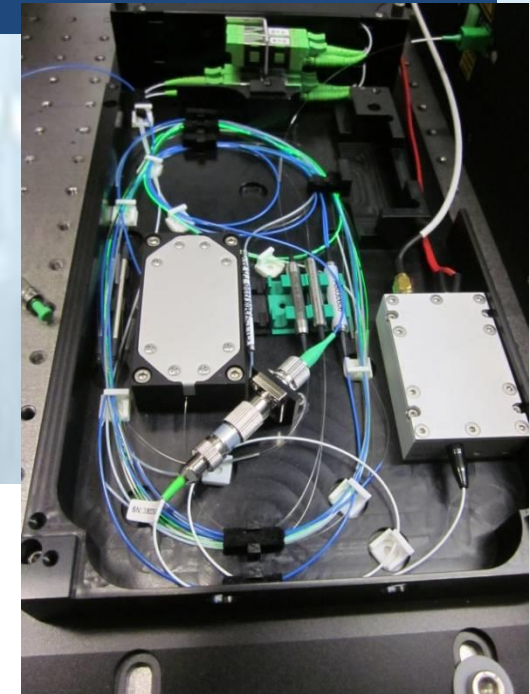
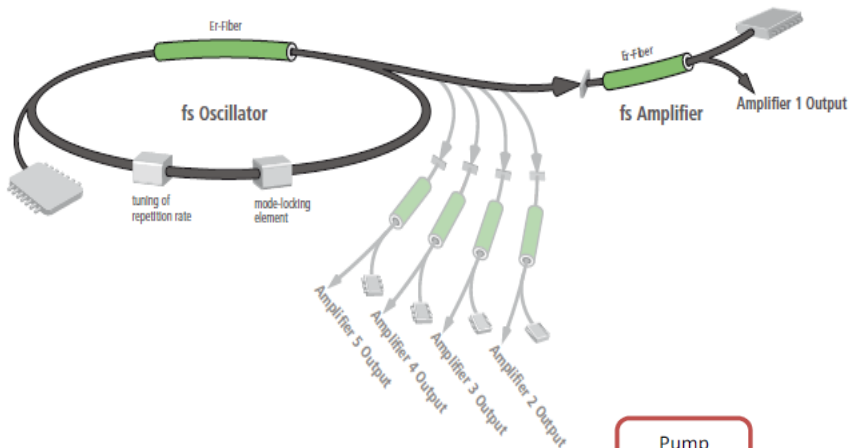


FIG. 1. PTB's frequency chain to the Ca intercombination line (PLL = phase locked loop, details are given in the text).



SINTISAJZER OPTIČKIH FREKVENCIJA - KOMB GENERATOR



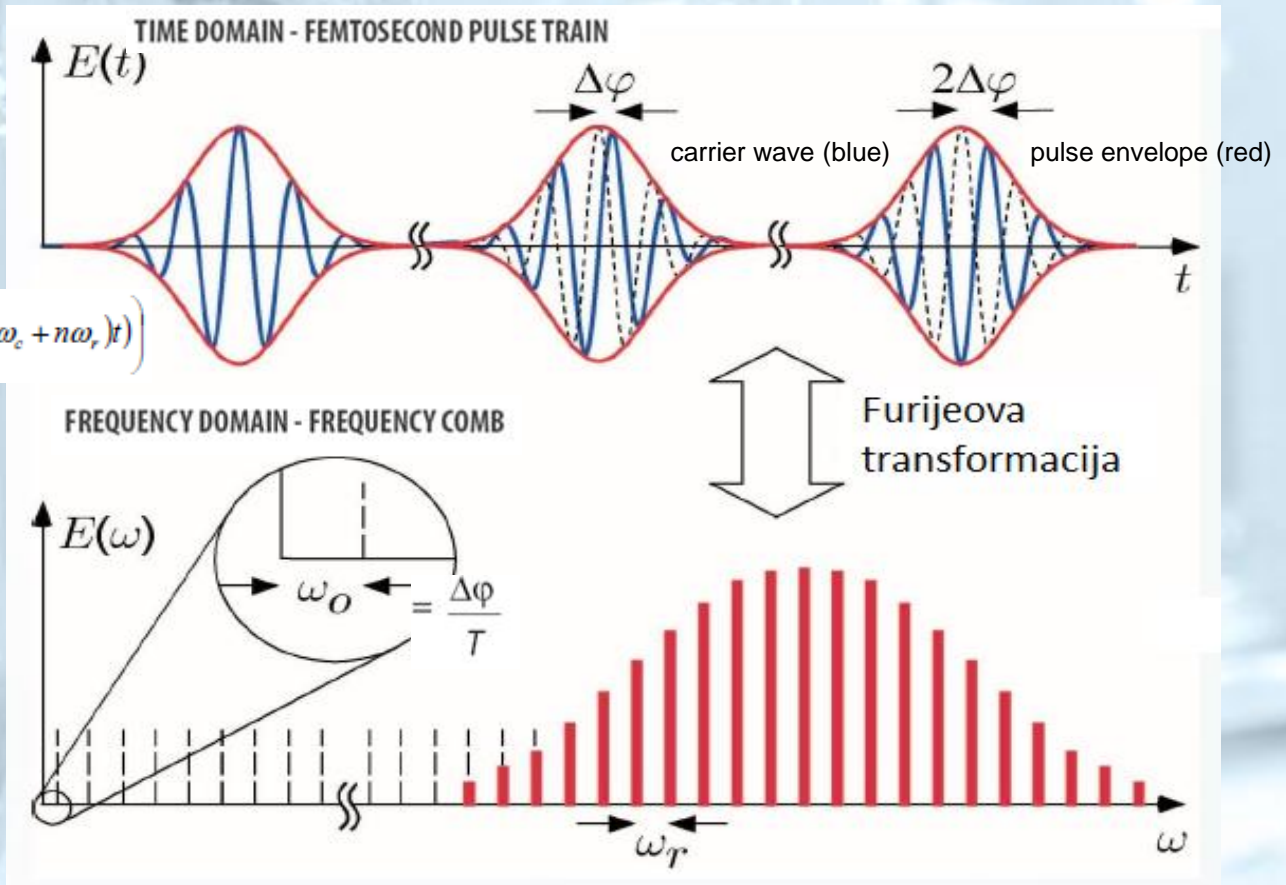


SINTISAJZER OPTIČKIH FREKVENCIJA - KOMB GENERATOR

$$T = 2\pi/\omega_r$$

$$T = 2L/v_g$$

$$E(t) = \text{Re}(A(t) \cdot \exp(-i\omega_c t)) = \text{Re}\left(\sum_n A_n \cdot \exp(-i(\omega_c + n\omega_r, t))\right)$$



$$\omega_n = n \cdot \omega_r + \omega_0$$



SINTISAJZER OPTIČKIH FREKVENCIJA - KOMB GENERATOR

- Optička frekvencija (n-ti mod) zračenja komba ω_n , uz uslov $\omega_o < \omega_r$ može se predstaviti kao jednostavna funkcija dve RF frekvencije koje se mogu meriti

$$\omega_n = n \cdot \omega_r + \omega_o$$

gde je n veoma veliki ($\approx 10^6$) ceo broj i predstavlja n-ti mod komba.

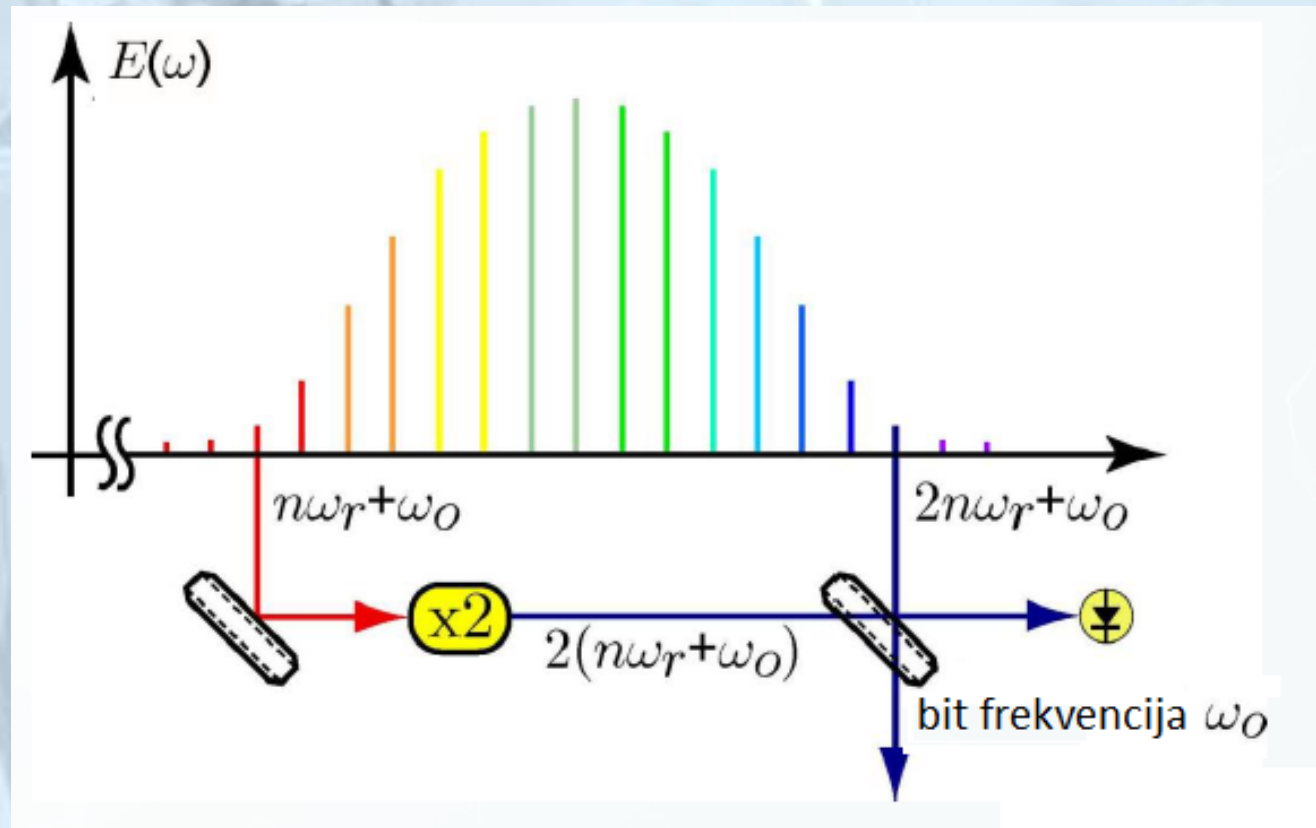
- Da bi se postigla stabilizacija frekvencije zračenja komba, a na osnovu gornje jednačine, vidi se da je neophodno stabilisati dva parametra komba: frekvenciju ponavljanja impulsa ω_r i ofset frekvenciju ω_o .



SINTISAJZER OPTIČKIH FREKVENCIJA - KOMB GENERATOR

$$2\omega_n = 2(n \cdot \omega_r + \omega_o)$$

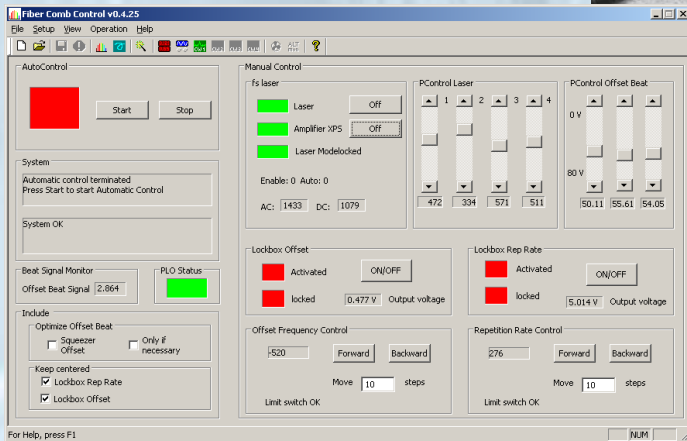
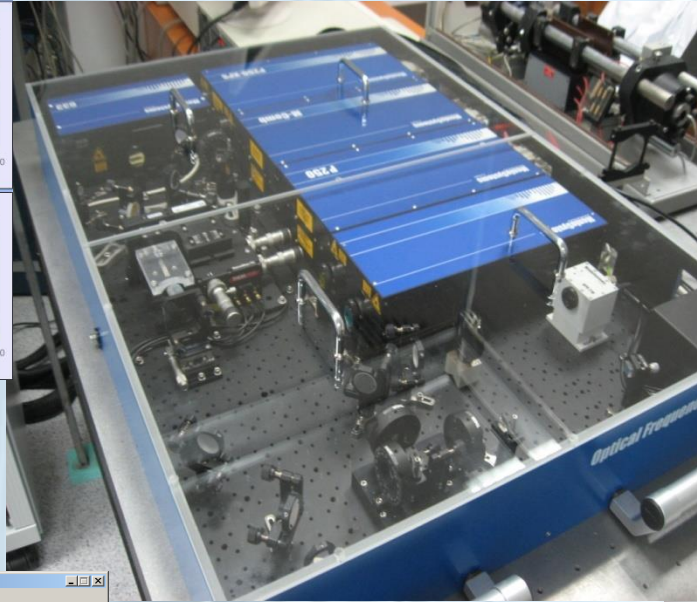
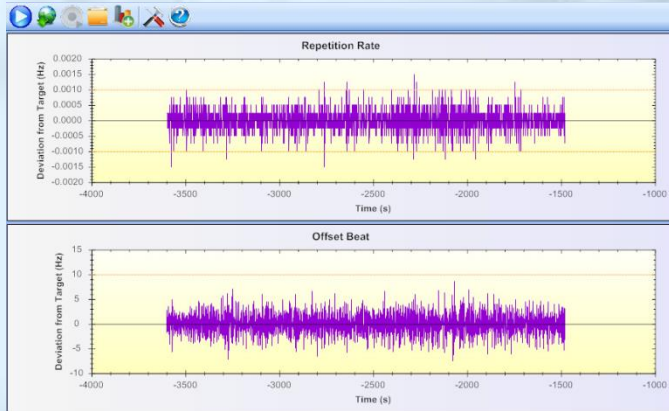
$$\omega_{2n} = 2n \cdot \omega_r + \omega_o$$



$$\omega_{\text{beat}} = 2\omega_n - \omega_{2n} =$$
$$2(n \cdot \omega_r + \omega_o) - (2n \cdot \omega_r + \omega_o) = \omega_o$$



KARAKTERISTIKE DMDM KOMB GENERATORA





KARAKTERISTIKE DMDM KOMB GENERATORA

DMDM komb sistem sastoji se od sledećih glavnih delova:

- optička jedinica sa fs fiber laserom i f-2f interferometrom;
- elektronska jedinica;
- M-VIS pakovanje za proširenje mernog opsega komba na vidljivi deo spektra;
- Specijalizovani merni portovi za precizna merenja frekvencije zračenja stabilisanih lasera malih snaga. DMDM komb ima portove za etaloniranje lasera talasnih dužina 532 nm, 543 nm, 633 nm i 778 nm,.
- Jedinica za detekciju i merenje bit signala između komba i spoljašnjeg CW lasera sa optikom u slobodnom polju;



KARAKTERISTIKE DMDM KOMB GENERATORA

Osnovna optička jedinica

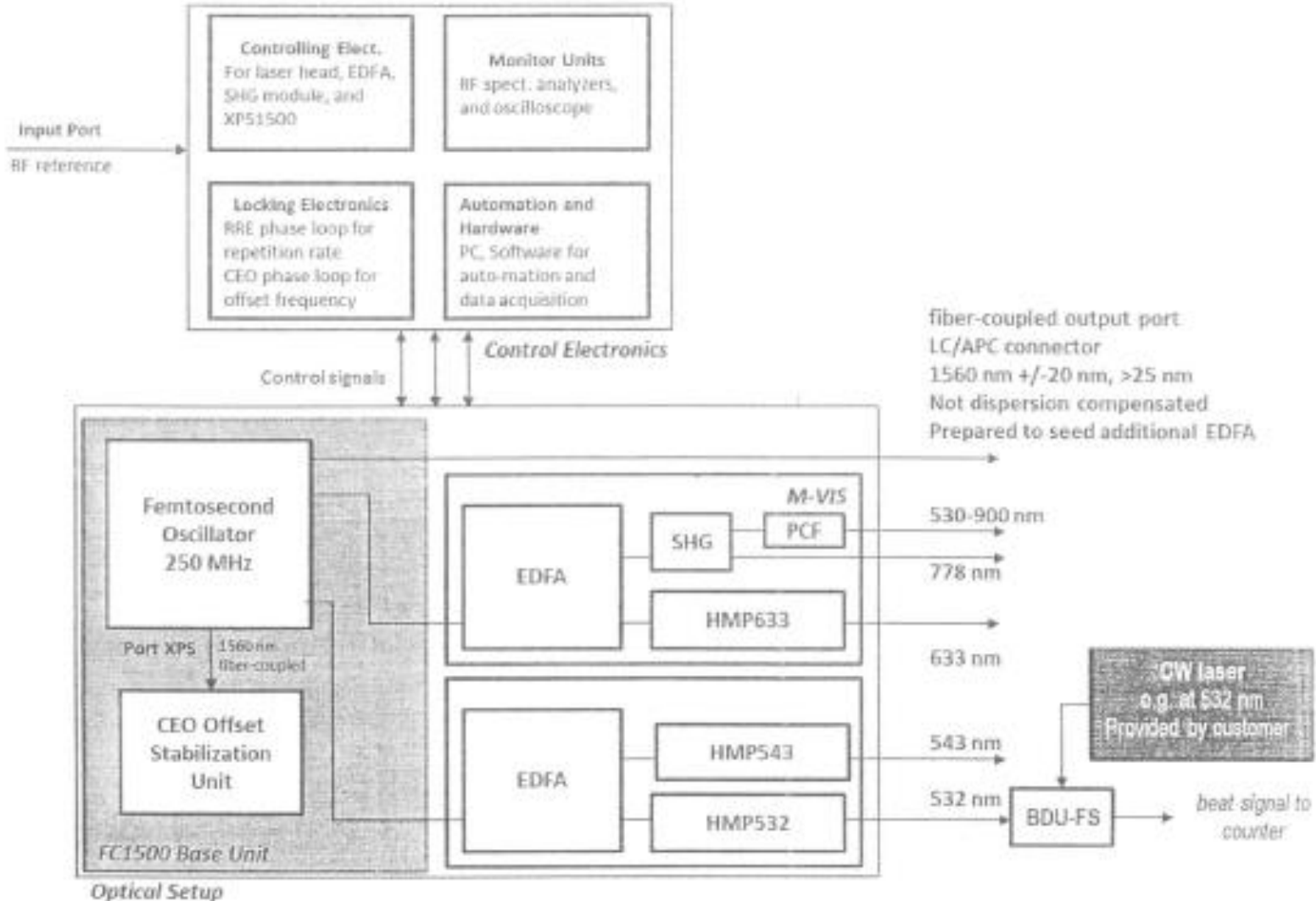
- Centralna talasna dužina 1560 nm \pm 20 nm
- Opseg talasne dužine >35 nm
- Rastojanje između modova 250 MHz
- Merna nesigurnost 10^{-14} ili isto kao referenca
- Stabilnost 5×10^{-13} ili isto kao referenca
- Opseg podešavanja rastojanja između modova >2 MH
- Opseg podešavanja CEO frekvencije >250 MHz

M-VIS pakovanje za vidljivi deo spektra

- Spektralni opseg (530 – 900) nm



KARAKTERISTIKE DMDM KOMB GENERATORA





LANAC SLEDIVOSTI - PRIMER

Definicija SI sekunde

Cs clock

Definicija SI metra

Realizacija – *Mise en Pratique*
Nacionalni primarni etalon
Frekvencijsko stabilisani He-Ne laser – 633 nm
 $2,5 \times 10^{-11}$

Primarni nivo

Komb generator

Interferometar za
granične mere do 100 mm

Stabilisani He-Ne laser
633 nm, 543 nm
 1×10^{-9}

Referentni nivo

Granične mere klase K
(20 – 40) nm

Mehanički komparator
30 nm

Radni etaloni

Granične mere klase 0
(50 – 100) nm

Mehanički komparator

Merila

Granične mere klase 1,2

Mikrometri, pomična merila...
Nesigurnost reda veličine mikrometra i više



ZAKLJUČAK

Nabavkom komb generatora DMDM je znatno smanjila mernu nesigurnost etaloniranja i to za nekoliko redova veličine. Jedno stabilisani laseri imaju relativnu nesigurnost reprodukovanja frekvencije, odnosno talasne dužine, reda veličine $\sim 10^{-11}$.

Komb sistemi imaju relativnu nesigurnost kao i spoljna referenca, odnosno atomski časovnik. U zavisnosti od tipa reference (cezijumski, rubidijumski časovnik i sl.) relativna nesigurnost se može smanjiti do reda veličine $\sim 10^{-12} \div \sim 10^{-14}$. S

S druge strane, merni opseg merenja različitih talasnih dužina je povećan. Do sada je DMDM mogla etalonirati samo lasere (između ostalog i lasere u sastavu laserskih interferometara za direktno merenje dužine) talasne dužine 633 nm. Nabavkom komb sistema koji reprodukuje superkontinuum talasnih dužina u vidljivom i bliskom infracrvenom delu spektra taj opseg je znatno povećan.

Centralna frekvencija komb sistema od 1560 nm nalazi se u delu spektra koji je od izuzetnog značaja u oblasti telekomunikacija. Nadalje, komb generator predstavlja direktnu vezu između, trenutno, dve jedine osnovne jedinice SI sistema koje su definisane preko fundamentalnih fizičkih konstanti – metra i sekunde.

Komb sistemi će imati važnu ulogu u eventualnoj budućoj redefiniciji SI sekunde. Iz svega navednog može se zaključiti da je nabavkom komb generatora DMDM znatno unapredila svoje mogućnosti merenja i etaloniranja na primarnom nivou u oblasti dužine i optičkih frekvencija, uz otvorenu mogućnost primene komba i u nekim drugim oblastima kao što su telekomunikacije, precizna spektroskopija i sl.



РЕПУБЛИКА СРБИЈА
Министарство привреде



ДИРЕКЦИЈА ЗА МЕРЕ И ДРАГОЦЕНЕ МЕТАЛЕ

ХВАЛА НА ПАЖЊИ!

www.dmdm.gov.rs

zelenika@dmdm.rs