

Warszawa, 14.03.2015

prof. dr hab. inż. Jan K. Jabczyński,
Wojskowa Akademia Techniczna,
Instytut Optoelektroniki

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Filipa OZIMKA pt.

„Porównanie optycznych wzorców częstości za pomocą stabilizowanego łącza światłowodowego”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej pana mgr. Filipa Ozimka są optyczne wzorce częstości bazujące na laserach włóknowych ze stabilizacją częstości do zewnętrznej wnęki Fabry-Perota oraz zagadnienia transferu częstości optycznych w specjalnych torach światłowodowych. Należy dodać, że wymienione w tytule pracy wzorce i łącze światłowodowe, stanowiące części składowe dzieła, zostały samodzielnie opracowane przez Doktoranta w ZO IFD UW. Zasadniczymi celami rozprawy były budowa stabilnych wzorców częstości optycznych oraz badania nad porównaniem częstości dwóch wzorców połączonych łączem światłowodowym.

Dysertacja ma charakter konstrukcyjno – pomiarowy, poparta jest także niezbędnymi wywodami teoretycznymi objaśniającymi zasady pracy podstawowych elementów i podzespołów (m.in. lasera ze stabilizacją częstości do zewnętrznej wnęki Fabry-Perota, czy dwukierunkowego łącza światłowodowego z optoelektroniczną kompensacją fazy). Zarówno zrealizowane zadania konstrukcyjne jak i przeprowadzone pomiary budzą najwyższe uznanie. Należy dodać, że doktorant jest współautorem 10 artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie z listy JCR, z których co najmniej 3 bezpośrednio związane są z tematyką przedstawioną w dysertacji.

Praca składa się z 5 rozdziałów z których 3 zawierają opis dzieła naukowego doktoranta oraz 3 dodatków zawierających wybraną dokumentację podzespołów tworzących wzorce częstotliwości. Autor wykazał się wiedzą teoretyczną i dobrym rozpoznaniem naukowym w tematyce pracy o czym świadczy m.in. właściwie dobrana bibliografia pracy licząca 115 pozycji. W rozdz. 2. autor przedstawia podstawowe zagadnienia teoretyczne związane z elementami opracowanego wzorca częstości optycznej (laser ze sprzężeniem do zewnętrznego rezonatora Fabry-Perota, łącze światłowodowe z interferometryczną kompensacją fazy), kończąc go krótkim opisem zasad pracy układów ze sprzężeniem zwrotnym w ramach teorii sterowania. Przedstawiona w tym rozdziale czysto teoretyczna analiza kształtu linii widmowej na gruncie teorii sygnałów losowych, nie uwzględnia specyfiki generacji laserowej, wpływu ośrodka czynnego oraz wielu innych czynników i ograniczeń. Autor korzysta w pracy z komercyjnych, jednoczęstotliwościowych laserów włóknowych, ich porównanie np. z laserami NPRO czy też laserami półprzewodnikowymi pod kątem własności metrologicznych istotnie wzbogaciłoby tę część. Ponadto w tym miejscu lub w rozdz. 3. wskazane byłoby odniesienie analizowanego tu źródła laserowego do granicy kwantowej szerokości linii generatora laserowego oraz wskazanie technicznych źródeł / przyczyn poszerzenia lub / i dryfu linii generacji. Wg przeprowadzonej w p. 2.6 analizy fluktuacji termicznych zastosowanego w pracy pasywnego rezonatora tj. etalonu Fabry-Perota o bazie $L=10$ cm, ich wpływ jest pomijalny (daje odchylenie Allana na poziomie 10^{-16}) w porównaniu z szumami technicznymi. Natomiast brak jest przekonującej argumentacji na rzecz doboru (ewentualnej optymalizacji ?) długości etalonu ze względu na

ograniczenia techniczne. Pewne wątpliwości budzi także oszacowanie podatności przesunięcia rezonansu F-P na moc wiązki padającej (str. 32-33). Pozwoliłem sobie przeprowadzić te obliczenia biorąc dane pomiarowe przedstawione w rozdz. 4. Dla mocy padającej $P_{\text{pad}} = 100 \mu\text{W}$ oraz smukłości (*finesse*) $\mathcal{F} = 400\,000$ i strat absorpcyjnych w jednym zwierciadle na poziomie $1 \cdot 10^{-7}$ po podstawieniu do wzoru (2.48) otrzymujemy względne wydłużenie $\Delta L/L \sim 10^{-11}$, co odpowiada przyrostowi częstości $\Delta \nu = 15 \text{ mHz}$ dla $100 \mu\text{W}$, czyli czułości $\Delta \nu / \Delta P_{\text{pad}} = 151 \text{ Hz/W}$ w odniesieniu do mocy padającej a więc wartości bardzo znacznie różniące się od podanej przez Autora na str. 33 ($20 \text{ Hz}/\mu\text{W}$).

Zasadniczą część merytoryczną pracy stanowią dwa kolejne rozdziały: 3. – poświęcony opisowi układu doświadczalnego oraz rozdz. 4. zawierający wyniki pomiarów. Autor, prezentując w rozdz. 3. konstrukcje i niektóre wyniki pomiarów, opisuje układy optyczne, optoelektroniczne oraz tory elektroniczne realizujące zadane funkcje kontrolno-pomiarowe stabilizowanego wzorca laserowego. Warty podkreślenia jest tu znakomity poziom wiedzy i umiejętności praktycznych doktoranta z obszaru elektroniki niezbędny do integracji tak złożonego układu sterowania i kontroli oraz opracowanie oryginalnych sterowników temperaturowych o rozdzielczości na poziomie 0.01 K . W dalszej części przedstawiono łącze światłowodowe z interferometryczną kompensacją fazy oraz cały system do porównywania częstości optycznych. System ten wraz z wynikami pomiarów przedstawionymi w kolejnym rozdziale stanowi zasadnicze dzieło naukowe Doktoranta.

Nim przejdę do omawiania głównych osiągnięć Doktoranta, pozwolę sobie na kolejną uwagę krytyczną. Otóż, Autor zaproponował bardzo ciekawą i oryginalną wg mojej wiedzy metodę pomiaru parametrów zwierciadeł wnęki F-P, na podstawie pomiaru maksymalnej transmisji w rezonansie oraz czasu życia. Podane przez producenta etalonu F-P wartości smukłości $\mathcal{F} = 350\,000, 400\,000$ dobrze zgadzają się z przeprowadzonymi przez autora pomiarami, metoda zaproponowana przez niego może dać (przy poprawnej analizie pomiarów) wiarygodne oszacowanie strat absorpcyjnych. Niestety, interpretacja wyników pomiarów jest wątpliwa, o ile zastosujemy błędny wzór (4.4) (być może to błąd literowy?). Co zaskakujące, przedstawione na str. 75 wartości obliczonych przez Autora transmisji i strat absorpcyjnych zwierciadła nie odbiegają istotnie od wyników obliczonych przeze mnie na podstawie innego modelu rezonatora F-P [92]. Nie wpływa to w istotny sposób na dalsze wywody, nie mniej ze względu na oryginalność metody pomiaru, warto wyjaśnić i ten problem.

Dalsza część wyników pomiarowych przedstawionych w rozdz. 4. budzi najwyższe uznanie. Autor przeprowadził kompleksowe badania wpływu różnych czynników (m.in. drgań mechanicznych, temperatury itp.) na stabilność częstości obu wzorców laserowych oraz ich względną stabilność, ocenił ponadto jakość metrologiczną 50-km łącza światłowodowego zastosowanego do transmisji promieniowania jednego ze źródeł. Pokazał m.in. że względna stabilność obu źródeł jest na poziomie setek Hz co jest wynikiem znakomitym. Pojawia się tu kolejny paradoks lub pytanie do Autora. Mianowicie jak wyjaśnić tak znakomitą względną stabilność linii gdy szerokość rezonansu wnęki Fabry-Perota wynosi $c/(2L\mathcal{F}) \sim 4 \text{ kHz}$?

Pewne problemy stwarza długoczasowa stabilność wzorców laserowych związana, wg opinii Autora, z efektem pęcznienia materiału stanowiącego bazę rezonatorów (szkła ULE). Zastanawiający jest tu fakt uzyskania minimalnej rozszerzalności bazy dla temperatury około 28°C , wg danych producenta powinno to mieć miejsce w dość szerokim przedziale ($-5, 40^\circ\text{C}$). Czyżby tak istotny parametr był „przypadkową” cechą technologiczną i zmieniał się od próbki do próbki, lub też występuje istotna różnica między temperaturą etalonu a temperaturą czujnika? Minimum odchylenia Allana dla obu stabilizowanych źródeł uzyskiwane dla czasów bramki rzędu kilku sekund wynosi około 10^{-14} podczas gdy jakość toru przesyłowego jest znacznie lepsza ($\sigma_y < 10^{-14}$). Tym samym Autor udowodnił zasadność stosowania do

transmisji wzorca częstości optycznej specjalnego światłowodowego toru optycznego (łącza dwukierunkowego z interferometryczną kontrolą bazy).

W ostatnim 5. rozdziale Autor podsumował pomiary i porównał je z opublikowanymi wynikami z innych ośrodków. Parametry metrologiczne łącza światłowodowego do przesyłania częstości wzorca optycznego sytuują to rozwiązanie w czołówce światowej. Jest to stwierdzenie w pewnym sensie subiektywne, o czym pisze Doktorant, gdyż zależy od szczególnych parametrów technicznych samego toru. Wyniki pomiaru stabilności częstości lasera na poziomie 10^{-14} są ograniczone przez zewnętrzne źródła zakłóceń mechanicznych, podczas gdy najlepsze wyniki światowe są na poziomie 10^{-16} . Można wyrazić nadzieję, że w nowym laboratorium przy znacznym zmniejszeniu wibracji wyniki zostaną poprawione.

Rozprawa napisana jest zrozumiałym i prostym językiem, jednakże w licznych miejscach można znaleźć wiele drobnych usterek językowych z częstością ~ 0.3 / str. (literówek, błędów gramatycznych, oraz parę nieistotnych błędów we wzorach) wynikających najprawdopodobniej z pobieżnej korekty komputerowej. Szczegółowy wykaz błędów przedstawiono w załączniku. Tematyka pracy dotyczy bardzo nowoczesnego obszaru fotoniki, dla którego czasami brak jest ugruntowanych norm językowych / odpowiedników pojęć w języku polskim. Należy podkreślić konsekwentną polonizację wszystkich pojęć stosowaną przez Autora w całej pracy za jednym wyjątkiem. Autor mianowicie używa wziętego z angielskiego określenia *finesse* które z powodzeniem od lat w polskim języku technicznym zastępuje się np. słowem smukłość krzywej rezonansowej.

Doktorant wykazał się szeroką wiedzą praktyczną z wielu obszarów współczesnej fotoniki i elektroniki. Na podkreślenie zasługuje samodzielność w projektowaniu i implementacji często bardzo skomplikowanych elektronicznych układów sterowania i kontroli. Powstałe dzieło naukowo-techniczne (tj. para źródeł laserowych ze stabilizacją częstości na poziomie 10^{-14}) jest na międzynarodowym poziomie i wzbudza szacunek. Moje uwagi krytyczne, a w szczególności te dotyczące edycji pracy, nie umniejszają bardzo wysokiej oceny samego dzieła naukowego mgr Filipa Ozimka.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa spełnia z nadmiarem warunki określone w *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Uważam rozprawę za przydatną do nauk stosowanych i stwierdzam, że można ją zaliczyć do kategorii: **bardzo dobrych**.

Załącznik: Tabela usterek językowych i innych znalezionych w dysertacji
mgr F. Ozimka

nr	str	wiersz		typ
1	6	16	kwantowych	gr
2	10	16	przydana	liter
3	14	8	będącymi	gr
4	16	1	fukcja	liter
5	18	12	jest taką samą częstość	gr
6	23	1	optycznej	liter
7	23	27	start	liter
8	23	28	start	liter
9	24	24	ze rozciąganie	gr
10	27	3	wzór 2.36 brak nawiasu	mat
11	30	4	działa - ć	liter
12	30	1,6	ρ, σ - różne oznaczenia na liczbę Poissona na str 30,31	liter
13	33	6	k - przew. Ciepła [W/m/K]	miano
14	33	6	ρ - gęstość w [kg/m ³]	miano
15	36	17	powyżej x 2	liter
16	36	16	odwrotność $v = \tau$	mat
17	54	12	przyspieszenie pionowego	liter
18	55	8	uniwersalność i automatycznego	gr
19	57	18	w / usunąć	liter
20	64	19	takich	liter
21	68	3 od do	napiecia	liter
22	68	2 od do	elementy	liter
23	69	od do	3.12	liter
24	76	od do	4.3	liter
25	80	15	starać	liter
26	85	1	niezgodność opisu z rys 4.10 (b nie c)	liter
27	85	od do	wibroizolatorach	liter
28	94	od do	są	liter
29	94	od do	z	liter
30	100	2	przyjmują	liter
31	105	13	częstości	liter
			średnia częstość błędów [1/str]	0,30