

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Aleksandra Głuszka**

**zatytułowanej:**

**Światłowodowe optyczne grzebień częstotliwości z nasycalnymi absorberami na bazie nanomaterialów dla spektroskopii laserowej**

### **I. Informacje ogólne**

Zakres tematyczny pracy obejmuje projektowanie, praktyczną budowę i zastosowania laserów impulsowych z pasywną synchronizacją modów, wykorzystujących grafen jako nasycalny absorber. Jako cele szczegółowe Autor określił budowę i optymalizację laserów, badanie metod ich regulacji i stabilizacji, oraz praktyczne wykorzystanie opracowanych laserów w spektroskopii i budowie grzebieni częstotliwości optycznych.

Doktorant sformułował tezę badawczą, w której stwierdza możliwość realizacji spektroskopii Verniera w oparciu o pasywnie stabilizowane lasery impulsowe.

Taki obszar i cel badań jest ciekawy i bardzo aktualny. Lasery impulsowe oraz budowane na ich bazie grzebień częstotliwości znajdują coraz to nowe zastosowania w technice sensorowej, metrologii i ogólnie wielu obszarach „styku” domeny elektrycznej i optycznej. Warto zaznaczyć, że ze względu na mnogość renomowanych ośrodków zajmujących się tą tematyką, jej podjęcie oznacza aktywne włączenie się w obszar badań naznaczony bardzo silną konkurencją podejmujących ją ośrodków.

Przedstawione w pracy wątki badawcze i konstrukcyjne były realizowane zespołowo, w grupie Elektroniki Laserowej i Światłowodowej na Politechnice Wrocławskiej, oraz w ośrodkach zagranicznych, gdzie autor odbywał staże naukowe. Należy podkreślić, że jest to całkowicie naturalne wobec rozległości tematycznej i obszerności opisywanych pac. Indywidualny wkład autora rozprawy w pracę zespołową został starannie i rzetelnie rozgraniczony i wskazany. Ogólnie, autor wskazuje jako autorskie konstrukcje kilku wersji laserów impulsowych, oraz dedykowanych układów elektronicznych i optoelektronicznych służących do sterowania i stabilizacji tychże laserów, oraz opartych na nich grzebieni częstotliwości optycznych.

Doktorant wskazuje współautorstwo sześciu publikacji w renomowanych czasopismach i siedemnastu referatów konferencyjnych jako związanych bezpośrednio z tematyką rozprawy.

Przedłożona praca wpisuje się w dyscyplinę automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych, warto jednakże pozytywnie odnotować jej znaczącą interdyscyplinarność, przejawiającą się obecnością aspektów m. in. fizyki atomowej, optyki i fotoniki.

## II. Struktura rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa liczy 160 stron i składa się z trzech zasadniczych rozdziałów przedstawiających autorskie dokonania Doktoranta (rozdziały 3 - 5), poprzedzonych wprowadzeniem (rozdział 1), oraz rozdziałem przedstawiającym kompendium wiedzy dotyczącej laserów impulsowych wykorzystujących nasycalne absorbery (rozdział 2). Pracę zamykają: zakończenie, streszczenie, wykaz osiągnięć i bibliografia. Bibliografia zawiera 263 pozycje, stanowiące wyczerpujący zbiór istotnych i aktualnych prac dotyczących poruszanych zagadnień.

Cykl kluczowych sekcji pracy rozpoczyna rozdział 3, w którym Doktorant opisuje konstrukcję i pomiary kilku wersji laserów światłowodowych, bazujących na modułach funkcjonalnych opracowanych przez Autora, jak stabilizowana termicznie obudowa, kontroler temperatury, modulatory piezoelektryczne, zasilacze laserów pompujących.

Rozdział 4 dotyczy spektroskopii laserowej. W początkowej części zawiera on ogólne informacje wprowadzające czytelnika w zagadnienie spektroskopii i pewne szczegółowe rozwiązania, jak spektroskopia Verniera. W dalszej części rozdziału Autor przedstawia praktyczne zastosowanie własnych konstrukcji laserów w systemach spektroskopii laserowej. Ponadto w rozdziale tym opisano system generacji częstotliwości różnicowej, emitujący dyskretne widmo optyczne w zakresie 7 - 9  $\mu\text{m}$ . Przedstawiono też praktycznie pomierzone widma absorpcyjne różnych gazów.

W rozdziale 5 Autor prezentuje rozbudowę skonstruowanych wcześniej laserów do funkcjonalności grzebienia optycznego, poprzez opracowanie odpowiedniego wzmacniacza optycznego, interferometru  $f - 2f$ , oraz układów stabilizacji częstotliwości offsetowej i częstotliwości repetycji. Przedstawiono tu też rozwiązanie komparatora fazy o szerokim zakresie detekcji różnicy faz sygnałów wejściowych, zastosowany z powodzeniem w układach stabilizacji lasera. Zaprezentowano wyniki eksperymentalne ilustrujące skuteczność stabilizacji częstotliwości offsetowej i częstotliwości repetycji.

**Oceniając strukturę przedłożonej rozprawy, należy stwierdzić, że jest ona poprawna i klarowna.**

## III. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

Nakreślony przez autora cel pracy, który obejmował konstrukcję, optymalizację i aplikacje laserów z pasywną synchronizacją modów, jest bardzo ambitny i rozległy tematycznie. Jego realizacja wymagała rozległej wiedzy teoretycznej zarówno w obszarze elektroniki, jak też fizyki i fotoniki. Na szczególne podkreślenie zasługuje konstruktorska pasja i determinacja Doktoranta, który starał się budować swoje urządzenia nie tylko w celu osiągnięcia mniej lub bardziej ulotnych „wyników eksperymentalnych”, lecz w celu stworzenia rozwiązań przystosowanych do niezawodnej, bezobsługowej i długotrwałej pracy w realnych warunkach środowiskowych. Dlatego zdaniem recenzenta rezultaty pracy Autora są bardzo wartościowe również w perspektywie szerszej niż sama rozprawa doktorska – stanowią bowiem wartościowy wkład w ogólny potencjał badawczy i gospodarczy krajowego środowiska fonicznego.

W szczególności do wymiernych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie niezawodnych i kompaktowych rozwiązań światłowodowych laserów impulsowych wykorzystujących nasycalny absorber na bazie grafenu, wraz ze zintegrowanymi w technologii światłowodowej modulatorami fazy (długości optycznej rezonatora),
- opracowanie oryginalnego rozwiązania stabilizacji temperatury lasera poprzez zastosowanie kompozytowej płyty grzewczej, materiałów termoprzewodzących oraz obudowy o odpowiednio dobranej charakterystyce transportu ciepła,

- zaprojektowanie szeregu dedykowanych modułów elektronicznych niezbędnych do kontroli i stabilizacji pracy lasera, w szczególności układu komparatora fazy o szerokim zakresie liniowej pracy,
- demonstrację funkcjonalnego układu spektroskopii Verniera wykorzystującego opracowany przez autora laser bez konieczności stosowania złożonych układów stabilizacji jego parametrów (co odnosi się bezpośrednio do tezy pracy),
- demonstrację wykorzystania opracowanego lasera do budowy kompaktowego grzebienia optycznego.

Mimo pewnych zastrzeżeń i wątpliwości wymienionych poniżej, uważam, że przedstawione w rozprawie osiągnięcia stanowią spójną i wartościową całość, oraz że **cel pracy został w pełni osiągnięty, a zasadność przyjętej tezy rozprawy została wykazana.**

#### IV. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

##### A. Uwagi o charakterze ogólnym

1. Jak już wspomniano, opisane w rozprawie prace konstruktorskie i eksperymentalne są fragmentem szerszych prac zespołowych w grupie Elektroniki Laserowej i Światłowodowej. Fakt ten nie budzi zastrzeżeń, gdyż Doktorant jasno wskazuje swój wkład autorski, w szczególności w budowę dedykowanych modułów elektronicznych, jak kontroler temperatury, źródło częstotliwości referencyjnej, komparator fazy, układ zasilania laserów pompujących, dedykowane filtry częstotliwości radiowych. Problem polega jednak na tym, że układy te są raczej lakonicznie opisane w rozprawie, co utrudnia ocenę zaangażowanych w ich budowę kompetencji oraz analizę mierzalnych, liczbowych parametrów, jakie uzyskano. Przykładowo dotyczy to rysunków 3.3, 3.20, 5.8, 5.12 i towarzyszących im fragmentów tekstu. W pracy pojawia się wielokrotnie (począwszy od strony tytułowej) określenie różnych opracowanych układów jako „niskoszumne”, jednakże recenzent nie zauważył nigdzie informacji na temat faktycznie pomierzonych charakterystyk szumowych tych układów.

2. Niedosyt recenzenta budzi pewna skromność „narracji naukowej” zawartej w pracy. Autor rzetelnie (choć nieraz lakonicznie) opisuje skonstruowane przez siebie urządzenia i pokazuje wyniki przeprowadzonych eksperymentów, trudno się jednak doszukać różnych form naukowego namysłu i poszukiwań (np. analiz teoretycznych, obliczeń, symulacji, rozważania możliwych wariantów, prób optymalizacji itp.), które niewątpliwie towarzyszyły realizacji pracy.

3. Rozdział 4, opisujący spektroskopowe zastosowania opracowanych laserów nawiązuje do szczegółowych aspektów kilku zaawansowanych technik spektroskopowych. Niestety, opisy kontekstu (systemów, zasady ich działania), w którym zastosowano opracowane przez Autora lasery, są na tyle lakoniczne (brak wyjaśnień, rysunków), że czytelnik niebędący ekspertem w tym zakresie zamiast przekonania, że czegoś się dowiedział, doznaje jedynie frustracji. Przykładem niech będą dwa losowo wybrane zdania:

*Aktualnie, spektroskopia Verniera pozwala na budowanie szybkich, kompaktowych układów wykorzystujących np. lasery ICL pracujące w zakresie ok. 3,7  $\mu\text{m}$  do bezpośredniego odczytu widma optycznego w dziedzinie częstotliwości elektrycznych poprzez filtrację pojedynczych zębów grzebienia [218] (str. 86).*

*Mody pochodzące z charakterystyki etalonu otrzymano przez filtrację pasmowo-przepustową, którą zastosowano w celu usunięcia szumu o wysokiej częstotliwości i obwiedni mocy. (str. 91).*

Również komentarz do rys. 4.11 (str. 94), który wydaje się być istotny dla oceny uzyskanych rezultatów, nie jest dla recenzenta zrozumiały, gdyż pojawiają się tam enigmatyczne

stwierdzenia nieumocowane w całości wywodu.

## B. Istotniejsze uwagi szczegółowe

1. W rozdz. 3 prezentowane są badania mierzące do opracowania lasera do zastosowań w układach spektroskopii i w grzebieniach optycznych. Autor (zasadnie) poświęca dużo uwagi metodom kontroli częstotliwości repetycji, równocześnie jednak przemilczając zagadnienie kontroli częstotliwości offsetowej, a w konsekwencji również kłopotliwe zjawisko sprzężenia modulacji częstotliwości repetycji i częstotliwości offsetowej. Jest to tym bardziej dziwne, że sam Autor zwraca uwagę na konieczność kontroli (stabilizacji) obydwu tych parametrów w rozdz. 2.5.
2. Na str. 76 oraz 79 Autor podaje wartość stosunku sygnał/szum nie wyjaśniając, jak (w jakim paśmie) określono szum; czy chodzi tu o szum w rzeczywistym paśmie toru sygnałowego, czy raczej o szum zmierzony w paśmie RBW analizatora. Skądinąd na rys. 3.27 podana wartość RBW wynosząca jakoby 91 kHz jest chyba błędna, a na rys. 3.30 w ogóle nie została podana.
3. Wzór (2.4) na str. 12 jest dla recenzenta niezrozumiały. Jeżeli  $K$  jest ciągłą zmienną względem której wykonujemy całkowanie, to jak należy rozumieć (dyskretne?) zmienne  $\Omega_n$ ,  $K_n$ ,  $\varphi_n$ ?
4. Wzory (2.9) i (2.10) budzą wątpliwości. Występujące w nich symbole nie są opisane. Wzory mają odróżnić absorber szybki od wolnego, a we wzorach tych nie występuje (?) czas. Nie jest jasne, czy wzory te mają korespondować z rys. 2.7 czy 2.8.
5. Wzór (2.16) wraz z akapitem powyżej sugerują, że pod wpływem zmiany temperatury światłowodu zmienia się jego efektywny współczynnik załamania, a nie zmienia się długość. To jest niezgodne z rzeczywistością.
6. Na str. 41 widnieje zdanie: „Zmiana prądu wpływa na zmianę poziomu wzbudzenia we włóknie aktywnym, co wpływa na poziom wzmocnienia, a tym samym na współczynnik załamania i w efekcie wypadkową dyspersję.” Recenzent nie jest przekonany, że zmiana współczynnika załamania „w efekcie” musi zmieniać dyspersję.
7. Na str. 49 pojawia się stwierdzenie:” W praktyce jest to wykres transformaty Fouriera funkcji autokorelacji znormalizowanej do fluktuacji mocy.” Na czym polega „normalizacja do fluktuacji mocy”?
8. Na str. 86 Autor podaje warunek:  $mFSR = n f_{rep}$  jako konieczny dla działania opisywanej metody spektroskopii. Czy oznacza to, że należy zastosować laser o zerowej częstotliwości offsetowej  $f_{ceo}$ ?
9. W rozdz. 4.3.1 (str. 98) pojawia się stwierdzenie, że technika DFG pozwala wyeliminować częstotliwość offsetową i sugeruje się, że ułatwia to konstrukcję grzebienia optycznego. Ponieważ stwierdzenie to pojawia się w rozdziale dotyczącym spektroskopii, można było oczekiwać, że fakt ten skomentowany będzie raczej w aspekcie spektroskopii. Jeżeli jednakowoż odniesiono go do budowy grzebienia, kontynuacji tego wątku można by się spodziewać w rozdz. 5, lecz tam on nie powraca. Nie jest zatem jasne, jaka jest intencja tego stwierdzenia.
10. W kilkunastu miejscach w rozdz. 4 pojawiają się określenia: „laser solitonowy”, widmo solitonowe”, częstotliwość solitonów itp. Pojęcia te nie są omówione w rozdz. 2, nie pojawiają się też w rozdz. 3 ani 5, wobec czego nie wiadomo, czy Autor w rozdz. 4 pisze o czymś innym (innym laserze?) niż wcześniej i później, czy też używa pojęcia soliton jako słowa-klucza do wyminięcia pewnych trudności w narracji.
11. Na str. 110 i 111 autor przedstawia optymalizację długości włókna wzmacniającego i pasywnego. Nie jest jasne, co oznacza stwierdzenie, że długość włókna pasywnego

dobierano tak, by uzyskać najkrótszy impuls i (jednocześnie?) najwyższą moc. Jaka zatem konkretnie była funkcja celu tej (tych?) optymalizacji? Nie jest też jasne, dlaczego kilkadziesiąt centymetrów włókna pasywnego (o praktycznie zerowym tłumieniu) redukuje drastycznie moc średnią, co sugeruje rys. 5.3.

12. Na str. 114 i 115 Autor podkreśla, że w interferometrze  $f - 2f$  należy zapewnić synchronizację (przekrycie czasowe) impulsów padających na fotodiode, by uzyskać sygnał zdudnienia. Jednakże rys. 5.6 pokazuje zasadę otrzymywania częstotliwości  $f_{ceo}$  poprzez zdudnianie dwóch dyskretnych prążków widma. Jak wiadomo z teorii sygnałów, dyskretny prążek w widmie odpowiada ciągłej fali sinusoidalnej, a nie impulsom, zatem skuteczność zdudniania dwu prążków nie powinna zależeć od ich relacji czasowej (fazowej).

13. Na str. 122 Autor stwierdza, że „Widmo reprezentujące częstotliwość przesunięcia obwiednia-nośna dla lasera pracującego w zbalansowanej dyspersji jest znacznie węższe i mniej zaszumione”. Stwierdzenie to nie wydaje się oczywiste, wskazana byłaby zatem próba wyjaśnienia tej obserwacji.

### C. Uwagi szczegółowe mniejszej wagi

14. Wzory (2.2) oraz (2.3) na str. 11 są identyczne, co zapewne oznacza błąd w jednym z nich. Ponadto zamieszczone poniżej określenie na liczbę falową zdaje się sugerować, że wzory te dotyczą rezonatora Fabry-Pérot, a nie rezonatora pierścieniowego, jak napisano nieco wyżej.

15. Na str. 12 pojawia się dziwne sformułowanie „kwadrat sumy ich intensywności”. Suma intensywności opisuje intensywność całkowitą, ale co opisuje (jaką informację zawiera) kwadrat sumy intensywności?

16. Na str. 13 Autor stwierdza, że częstotliwość  $f_{ceo}$  zawiera się w przedziale  $<0; f_{rep}>$ . Czy zatem inna spotykana interpretacja, że zawiera się ona w przedziale  $<-0,5 f_{rep}; 0,5 f_{rep}>$  jest zdaniem Autora niepoprawna?

17. Rys. 2.3 jak i tekst poniżej (poszukiwanie przejść przez zero) sugerują, że zdaniem Autora intensywność może przybierać wartości ujemne.

18. Co Autor rozumie przez „odzyskiwanie zboczy” (str. 16)? Wydaje się, że jest to niezręczna kalka z j. angielskiego.

19. Podpis pod rys. 2.26 jest mylący; krzywa niebieska nie przedstawia zapewne charakterystyki samego modulatora EOM, tylko charakterystykę modulacji  $f_{ceo}$  przy jego zastosowaniu. Pasma przenoszenia modulatora EOM, jak Autor napisał nieco wcześniej, sięga gigaherców.

20. Na str. 46 i w wielu innych miejscach Autor używa określenia „szum o względnym natężeniu”, co jest zdaniem recenzenta całkowicie nielogicznym tłumaczeniem angielskiego terminu RIN.

21. Na str. 46 występuje niejasne stwierdzenie: „wyjściowe widmo sygnału staje się splotem widma wyjściowego lasera”.

22. Warunek  $L=2\pi/FSR$  na rys. 4.2 i 4.4 wydaje się być niepoprawny; zdaniem recenzenta powinno być  $L=\pi/FSR$ .

23. Warunek  $4FSR=5f_{rep}$  widoczny na rys. 4.3 jest nieadekwatny do tegoż rysunku.

24. Na rys. 4.6 i 4.9 pokazano widmo sygnału optycznego i podano jego „szerokość połówkową”, czyli zapewne parametr FWHM. Dyskusyjne wydaje się zastosowanie tej miary do widma, które w sposób ewidentny odbiega od kształtu dzwonowego.

25. Rys. 5.20 A i B mają zapewne służyć zilustrowaniu skuteczności stabilizacji częstotliwości offsetowej, jednakże są one faktycznie nieporównywalne.

## V. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca, mimo wskazanych uchybień, jest ciekawa i wartościowa naukowo, oraz że autor wykazał dobre przygotowanie teoretyczne i umiejętność prowadzenia kreatywnej pracy naukowej oraz projektowej. Swoją pracą wniósł istotny wkład w potencjał naukowy i konstruktorski grupy Elektroniki Laserowej i Światłowodowej. **Uważam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania określone przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Przemysław Krehlik