

Warszawa, 7.06.2023

Prof. dr hab. Maciej Bugajski  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki  
Al. Lotników 32/46  
02 668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Grzesia pt. „Generacja impulsów optycznych o nanosekundowym i subnanosekundowym czasie trwania w laserach półprzewodnikowych”**

Rozprawa doktorska mgr. Pawła Grzesia dotyczy sposobów generacji krótkich impulsów optycznych z użyciem laserów półprzewodnikowych. W pracy rozważane są techniki generacji, które można zastosować w przypadku komercyjnie dostępnych laserów złączowych. Wyniki pracy mają istotne znaczenie dla takich aplikacji elektronicznych, jak układy typu LIDAR oraz układy do optycznej telekomunikacji z modulacją impulsową. Praca składa się z trzech głównych części: analizy teoretycznej, symulacji numerycznych oraz części doświadczalnej poświęconej zaprojektowaniu i zrealizowaniu układów sterowników diod laserowych. Praca dotyczy zagadnień należących do aktualnej tematyki badawczej o dużym znaczeniu dla nauk technicznych.

#### OMÓWIENIE PRACY

Rozprawa składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów zawierających wyniki analiz i badań własnych autora, podsumowania, bibliografii i czterech załączników. We wstępie autor uzasadnia wagę tematyki pracy i jej aktualność, formułuje cele pracy i omawia zakres badań. Cel pracy określony jest jako analiza procesów generacji impulsów optycznych o nanosekundowym i subnanosekundowym czasie trwania w laserach półprzewodnikowych oraz opracowanie układów elektronicznych umożliwiających ich uzyskanie, kształtowanie i pomiar energii.

W rozdziale pierwszym przedstawiono równania kinetyczne, będące podstawowym modelem zjawisk dynamicznych zachodzących w laserach. W zależności od typu dynamiki lasera równania te mogą przybierać różną postać. W najogólniejszym przypadku mają one postać równań Maxwella-Blocha. W przypadku laserów złączowych w których czas relaksacji poprzecznej jest znacznie krótszy niż czas życia nośników na górnym poziomie laserowym i czas życia fotonów we wnętrzu dla opisu dynamiki wystarczają dwa równania; pierwsze opisujące gęstość nośników i drugie opisujące zespolone natężenie pola elektrycznego we

wnęce. Dalszym krokiem jest rozdzielanie równania na natężenie pola na część rzeczywistą i urojoną co finalnie prowadzi do uzyskania równań na gęstość nośników, gęstość fotonów i fazę fali elektromagnetycznej. Trzecie z równań, wykorzystywane w analizie poszerzenia linii jest przez autora w dalszych rozważaniach pomijane. W drugiej części rozdziału autor analizuje rozwiązania stacjonarne równań kinetycznych, odpowiednie dla wolnych przebiegów prądu wymuszającego, i rozwiązania dla szybszych sygnałów wymagających uwzględnienia pełnej dynamiki lasera półprzewodnikowego. Do tego ostatniego przypadku wykorzystuje analizę małosygnałową równań kinetycznych. Ostatnim zagadnieniem rozważanym w rozdziale pierwszym jest odpowiedź lasera na impuls prostokątny. Otrzymane w rozdziale pierwszym wyrażenia analityczne są w dalszej części pracy konfrontowane z wynikami analizy numerycznej co pozwala na ocenę stosowanych przy ich wyprowadzaniu przybliżeń. Rozważania te mają istotne znaczenie dla uporządkowania terminologii i hierarchii zjawisk rozpatrywanych w dalszych częściach pracy.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu technik generacji impulsów w laserach półprzewodnikowych możliwych do zastosowania bez ingerencji w strukturę lasera czyli, *de facto*, możliwych do zastosowania w przypadku komercyjnych przyrządów. Opisane zostały: metoda modulacji bezpośredniej, metoda przełączania wzmocnienia i metoda przełączania dobroci rezonatora. W przypadku tej ostatniej konieczna jest jednak implementacja dodatkowych elementów w strukturze lasera; niezależnie kontrolowanych segmentów wzmacniacza i absorbera, czy sekcji nasycalnego absorbera. Rozdział kończy krótki opis metody synchronizacji modów podłużnych. Materiał porządkuje tabela prezentująca właściwości opisywanych metod generacji impulsów. Zarówno rozdział pierwszy jak i rozdział drugi świadczą o dobrym opanowaniu przez autora podstaw wiedzy z zakresu dynamicznych właściwości laserów półprzewodnikowych i stanowią dobry punkt wyjścia dla opisywanych w następnych rozdziałach oryginalnych prac autora w tej dziedzinie.

Rozdział trzeci poświęcony jest symulacjom numerycznym. Przeprowadzono w nim weryfikację poprawności otrzymanych w części analitycznej równań. Ponadto dokonano porównania różnych modeli matematycznych laserów półprzewodnikowych oraz określono wrażliwość odpowiedzi lasera na zmiany wymuszenia lub parametrów samego lasera. Wszystkie symulacje wykonane zostały w środowisku Matlab, z wykorzystaniem pakietu Simulink. W wyniku przeprowadzonych symulacji wyznaczono charakterystyki stałoprądowe oraz częstotliwościowe, przebiegi odpowiedzi lasera w dziedzinie czasu oraz charakterystyki w przestrzeni fazowej. W tym miejscu warto podkreślić jest wprowadzenie metody płaszczyzn fazowych, wykorzystywanej do opisu układów dynamicznych w teorii sterowania, jako narzędzia do analizy dynamiki lasera. Analizowana przez autora przestrzeń fazowa układu dynamicznego jest dwuwymiarowa a zmiennymi stanu są gęstość nośników i gęstość fotonów. Dodatkowo, z przyjętej postaci równań kinetycznych wynika, że dla każdego punktu przestrzeni fazowej można przypisać wektor zmiany stanu, uzyskując w ten sposób dwuwymiarowe pole wektorowe. Ewolucja układu pod wpływem zewnętrznego wymuszenia reprezentowana jest przez trajektorię w przestrzeni fazowej. Użycie koncepcji przestrzeni fazowej znakomicie porządkuje analizę dynamiki laserów. Symulacje numeryczne różnych przypadków dynamiki laserów stanowią wartościowy element pracy.

W wyniku przeprowadzonych symulacji zweryfikowano wyniki otrzymane na drodze analitycznej dla dwóch metod generacji impulsu: metody bezpośredniej modulacji prądu oraz metody przełączania wzmocnienia. W odniesieniu do pierwszej z metod stwierdzono, że w przypadku impulsów laserowych o czasie trwania rzędu kilkudziesięciu nanosekund i więcej, uzasadnione jest pomijanie dynamicznych zjawisk nieliniowych. W przypadku krótszych impulsów prądowych, opóźnienie odpowiedzi lasera jest wyraźne, a zniekształcenie impulsu jest pomijalne jedynie dla impulsów o dużej amplitudzie. W przypadku symulacji metody przełączania wzmocnienia stwierdzono, że analityczne równania opisujące w uproszczony sposób parametry wyjściowe impulsu laserowego dają akceptowalne wyniki. Pewna ostrożność wskazana jest jedynie w przypadku określania mocy szczytowej i nasycania wzmocnienia.

Rozdział czwarty poświęcony jest przedstawieniu wybranych układów elektronicznych do sterowania pracą impulsową laserów półprzewodnikowych. Rozważania autora koncentrują się na problemach generacji krótkich impulsów prądowych na potrzeby zastosowania w metodach modulacji bezpośredniej i przełączania wzmocnienia. Zaprezentowane zostały różne rozwiązania układowe, ich podstawy teoretyczne i przykłady realizacji sprzętowych. Szczególny nacisk położono na układy posiadające możliwość generacji impulsów na żądanie. Przy projektowaniu omawianych układów kładziono nacisk na kompaktową konstrukcję, wykorzystanie komercyjnie dostępnych podzespołów i niski koszt wytwarzania. Dodatkowym aspektem, na który zwracano uwagę była możliwość przestrajania parametrów impulsów wyjściowych, dzięki której przedstawione układy nadają się do aplikacji eksperymentalnych. Należy podkreślić, że tematyka projektowania układów do generacji krótkich impulsów laserowych, pomimo swej dojrzałości technologicznej, jest ciągle aktualna. Omawiany rozdział jest kluczowy dla całościowej oceny wartości pracy. Dowodzi on, że doktorant potrafi wykorzystywać zdobytą wiedzę teoretyczną do rozwiązywania konkretnych zadań inżynierskich.

W rozdziale piątym autor omawia zagadnienie tłumienia drgań relaksacyjnych występujących przy generacji nanosekundowych impulsów optycznych uzyskiwanych metodą modulacji bezpośredniej. Rozważane są: technika wstępnej polaryzacji diody laserowej za pomocą składowej stałej sygnału prądowego i technika polegająca na wstrzykiwaniu fotonów do wnęki rezonansowej lasera.

Rozdział szósty pracy poświęcony jest charakteryzacji impulsów optycznych. Przedstawiono w nim zaprojektowany i wykonany oryginalny układ miernika nanosekundowych impulsów laserowych. Idea miernika polega na wykorzystaniu pomiaru energii impulsu przy jednoczesnym założeniu, że jest ona proporcjonalna do jego amplitudy. Opracowany miernik jest w stanie mierzyć energię impulsów w zakresie od 0.4 pJ do 4 pJ. Miernik projektowany był na potrzeby układów automatycznej regulacji amplitudy sygnału, ale może również służyć jako narzędzie do monitorowania wyjścia z układu laserowego sygnalizując jego nieprawidłową pracę.

Autor uzyskał ochronę patentową na opisywany miernik. Miernik został także opisany w artykule: P. Grześ, M. Michalska, J. Świdorski, Real-time laser energy meter of nanosecond and subnanosecond optical pulses, *Measurement*, **163**, 107967 (2020), IF = 5.13. *Measurement*, wydawane przez Elsevier, należy do prestiżowych czasopism z dziedziny metrologii i zagadnień sprzętowych w pomiarach.



## WNIOSKI KOŃCOWE

Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy autora. Dowodzi ona dużej biegłości autora w zakresie fizyki laserów półprzewodnikowych i technik generacji i analizy ultrakrótkich impulsów laserowych. Cele pracy określone jako analiza procesów generacji impulsów optycznych o nanosekundowym i subnanosekundowym czasie trwania oraz opracowanie układów elektronicznych umożliwiających ich uzyskanie, kształtowanie i pomiar energii, zostały w pełni zrealizowane. Doktorant posiadał znaczną wiedzę w dziedzinie, która jest przedmiotem pracy i ze swobodą porusza się w obszarze dynamiki laserów półprzewodnikowych. Dowiódł również, że potrafi twórczo wykorzystywać zdobytą wiedzę teoretyczną do rozwiązywania konkretnych zadań inżynierskich. Jest to kwintesencja tego czego należy oczekiwać od wyróżniającej się pracy doktorskiej z dziedziny nauk technicznych. Doktorant ma znaczny dorobek publikacyjny. Jest autorem i współautorem 13 publikacji z listy MEiN i licznych publikacji pokonferencyjnych.

Praca jest zredagowana poprawnie i napisana w sposób jasny i przejrzysty. Zwraca uwagę staranna szata graficzna i poziom edytorski pracy. Forma opracowania i konstrukcja pracy są odpowiednie do jej zawartości merytorycznej. Wnioski są formułowane prawidłowo i podsumowane na końcu każdego z rozdziałów. Pracę uważam za bardzo dobrą, pozbawioną istotnych wad. Praca zawiera szereg oryginalnych wyników, których wartość naukową i użyteczność praktyczną w pełni może docenić każdy badacz zajmujący się techniką laserową.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska "Generacja impulsów optycznych o nanosekundowym i subnanosekundowym czasie trwania w laserach półprzewodnikowych" mgr. inż. Pawła Grzesia spełnia wymagania związane z uzyskaniem stopnia doktora, określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Pawła Grzesia do dalszego postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

**Jednocześnie uważam, że praca mgr inż. Pawła Grzesia stanowi znaczący wkład w poziom wiedzy w zakresie techniki laserowej i przyczynia się do głębszego zrozumienia procesów dynamicznych w laserach półprzewodnikowych. Wysoko oceniam również osiągnięcia projektowe i konstrukcyjne doktoranta. Na tej podstawie wnioskuję o wyróżnienie pracy.**

