

Streszczenie

Dla wielu dziedzin nauki oraz wielu rozwiązań technologicznych kluczowy jest rozwój nowych źródeł ultrakrótkich impulsów laserowych, które będą charakteryzowały się doskonałą stabilnością i powtarzalnością pracy. Niniejsza praca doktorska poświęcona jest zagadnieniom związanym z wytwarzaniem ultrakrótkich impulsów laserowych oraz ich propagacją w światłowodowych wnękach laserowych. W pracy przedstawiono nowe konstrukcje źródeł ultrakrótkich impulsów laserowych wykorzystujących sztuczne nasycalne absorbery we wnękach światłowodowych charakteryzujących się wyłącznie normalną dyspersją. Po raz pierwszy przedstawiono zastosowanie nieliniowego optycznego lustra pętlowego (ang. NOLM – *Nonlinear Optical Loop Mirror*) oraz techniki nieliniowej ewolucji polaryzacji (ang. NPE – *Nonlinear Polarization Evolution*) do generacji ultrakrótkich impulsów we wnękach laserowych zbudowanych wyłącznie ze światłowodów utrzymujących polaryzację (ang. PM – *Polarization Maintaining*). Wykorzystanie światłowodów dwójłomnych typu PM zapewniło doskonałą odporność źródła impulsów na zmiany w otaczającym je środowisku, takie jak drgania mechaniczne i znaczne fluktuacje temperatury. Wszystkie zbudowane źródła impulsów wykorzystywały światłowod aktywny domieszkowany jonami iterbu, a centralna długość fali impulsów była zbliżona do 1030 nm.

Na początku rozprawy przedstawiono podstawowe zagadnienia teoretyczne związane z propagacją impulsu laserowego w światłowodzie. Opisano zarówno liniowe, jak i nieliniowe zjawiska fizyczne wpływające na propagację, ze szczególnym zwróceniem uwagi na dyspersyjne właściwości światłowodów. W kolejnej części przedstawiono teorię wytwarzania ultrakrótkich impulsów laserowych za pomocą techniki aktywnej i pasywnej synchronizacji modów. Następnie zdefiniowano podstawowe parametry ultrakrótkiego impulsu laserowego, które będą wykorzystywane do opisu impulsów przedstawionych w kolejnych rozdziałach. Dokonano przeglądu podstawowych reżimów pracy oscylatorów światłowodowych zależnie od rodzaju dyspersji zastosowanego we wnęce laserowej. Reżim pracy lasera zdefiniowany jest poprzez zmiany parametrów impulsu (jego dynamiki) podczas propagacji. Następnie opisano rodzaje nasycalnych absorberów używanych, by zainicjować pracę impulsową źródła. Nasycalny absorber wprowadza we wnęce laserowej straty nieliniowo zależne od natężenia promieniowania. Przedstawiono rzeczywiste nasycalne absorbery wykorzystujące własności materiałów, z których są wykonane, oraz sztuczne nasycalne absorbery, których zasada działania opiera się na zmianie fazy impulsu w wyniku działania optycznych zjawisk nieliniowych. W szczególności przedstawiono zasadę działania NOLM i techniki NPE.

Następnie przedstawiono szereg wyników prac eksperymentalnych opisujących badania prowadzone nad całkowicie światłowodowymi wnękami laserowymi wykorzystującymi NOLM jako nasycalny absorber. Zastosowanie wyłącznie światłowodów i komponentów typu PM podczas budowy laserów znacząco zwiększyło ich odporność na drgania i udary mechaniczne oraz zmiany temperatury, co zostało potwierdzone badaniami eksperymentalnymi. Zaprezentowano metodę optymalizacji długości pętli NOLM na podstawie analizy widma impulsu odbitego od pętli. Optymalizacja długości pętli NOLM umożliwia uzyskanie impulsu laserowego o szerszym widmie i krótszym czasie trwania po kompresji. W kolejnych eksperymentach zbadano, jak funkcja opisująca transmisję filtra

spektralnego, wykorzystywanego do skrócenia impulsu ze świergotem w czasie, wpływa na parametry impulsu we wnętrzu. Udowodniono, że filtracja spektralna o stromych krawędziach skutkuje znacznymi modulacjami w widmie i rozkładzie natężenia impulsu laserowego. Za pomocą symulacji numerycznych prześlędzono zmiany parametrów impulsów podczas propagacji we wnętrzu i zdefiniowano ich dynamikę. Poprzez pomiar uśrednionej fazy spektralnej techniką SPIDER oraz dzięki pomiarowi widma każdego kolejnego impulsu techniką dyspersyjnej transformaty Fouriera dokładnie zbadano wpływ procesu wymuszonego rozproszenia Ramana (ang. SRS – *Stimulated Raman Scattering*) na destabilizację impulsu laserowego podczas propagacji we wnętrzu z normalną dyspersją. Udowodniono, że proces SRS destabilizuje jedynie część widma impulsu o długościach fal dłuższych niż centralna długość fali. Wszystkie oscylatory ze względu na wykorzystanie światłowodów wyłącznie z normalną dyspersją generowały impulsy z dodatnim świergotem, który był kompensowany poza wnętrzem. Najkrótszy czas trwania impulsów po kompresji wynosił 160 fs, a energia impulsów wynosiła 2 nJ.

Proces NPE opiera się na filtracji stanu polaryzacji impulsu, który propagował się w ośrodku nieliniowym i uległ zmianie głównie w wyniku optycznego efektu Kerra. Dotychczas większość zastosowań techniki NPE wymagała użycia standardowych włókien światłowodowych lub elementów optyki objętościowej w celu ustalenia stanu polaryzacji impulsu przed propagacją w ośrodku nieliniowym. W niniejszej rozprawie przedstawiono nowe podejście do realizacji techniki NPE wykorzystujące tylko i wyłącznie światłowody typu PM i element polaryzacyjny. Zaproponowano teoretycznie i zweryfikowano doświadczalnie metodę podziału światłowodu na segmenty o różnych długościach, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie nasycalnego absorbera wspierającego generację impulsów o szerokim widmie i ultrakrótkim czasie trwania. Przedstawiono, jak zmienia się transmisja zaproponowanego nasycalnego absorbera zależnie od podziału natężenia promieniowania na wyróżnionych osiach światłowodu PM. Zbadano również, jak niedokładności w długościach wykorzystanych światłowodów lub wykonanych spawów katowych wpływają na transmisję. Zaprezentowano dwie konfiguracje laserów wykorzystujących nowy nasycalny absorber w konfiguracji liniowej i odbiciowej. W przypadku konfiguracji odbiciowej konieczne było zastosowanie dodatkowego liniowego przesunięcia fazowego zrealizowanego poprzez użycie rotatora Faradaya i płytki fazowej. Zastosowanie przesuwnika fazy powoduje wzrost transmisji nasycalnego absorbera dla sygnału o niewielkim natężeniu oraz obniża wartość natężenia szczytowego promieniowania potrzebną do osiągnięcia maksimum transmisji nasycalnego absorbera. Najkrótszy czas trwania impulsów po kompresji dla powyżej opisanych oscylatorów wynosił 150 fs, a energia impulsów wynosiła 0,85 nJ.

Ostatnia część rozprawy zawiera szczegółowe podsumowanie oraz prezentuje najważniejsze wnioski. Dodatkowo przedstawiono potencjalne zastosowania zaprezentowanych wyników oraz kierunki przyszłego rozwoju prezentowanych laserów.

Rozprawa zawiera trzy dodatki. Pierwszy prezentuje konfigurację i parametry wykorzystywanego kompresora siatkowego wraz z numerycznym opisem zmian fazy wprowadzanych przez kompresor. Drugi dodatek opisuje aparaturę typu SPIDER wykorzystywaną do pomiaru fazy spektralnej w części eksperymentalnej niniejszej rozprawy. Trzeci dodatek prezentuje opis matematyczny macierzy Jonesa dla przesuwników fazy wykorzystujących rotatory Faradaya.