

## Abstract

The dissertation contains a discussion of research results on shaping selected properties of micro- and nanostructured specialty optical fibers dedicated to applications in fiber-based ultrashort pulse laser systems. The research was conducted in the context of application of specialty optical fibers in coherently seeded ultrafast fiber amplifiers. Two types of optical fibers were the research subject, distinguished based on their roles in fiber amplifier systems. The first one is related to structured optical fibers for a coherent white light pulse generation, *i.e.*, the supercontinuum. The goal was to develop optical fiber structures exhibiting high  $\chi^{(3)}$  nonlinearity, flat chromatic all-normal dispersion characteristics, and strong birefringence. The second type of the investigated fibers refers to the anti-resonant hollow-core fibers. The aim here was the development and experimental characterization of such fibers for enabling transmission of broadband, ultrashort laser pulses, with minimized spectro-temporal distortion caused by dispersion or nonlinear effects. Therefore, the described research relates to studying the propagation of electromagnetic waves in dielectric media, in the presence of a strong spatial confinement in a plane transverse to the propagation direction and over distances vastly exceeding the transverse dimensions of these media.

In the first part of the dissertation, all-glass, all-normal dispersion, and highly nonlinear structured optical fibers are described. The chapter contains the results of designing, fabrication, and experimental characterization of such fibers. As demonstrated, the fibers' optical nonlinearity enables the generation of full-octave spectrally broadened optical pulses entirely in the normal dispersion wavelength range. The generation process is stimulated by femtosecond laser pulses with peak powers not exceeding several tens of kilowatts. Pulses are generated by compact mode-locked fiber lasers at repetition rates not lower than several tens of MHz. This approach allows for a direct seeding of continuous-wave pumped fiber amplifiers. However, since such sources have a limited peak power, the analysis is concentrated on soft-glass fiber structures with a high nonlinear refractive index. In the research work scope, in-house numerical tools for structured fiber designing were developed based on the finite element method. The numerical tools allow for the inclusion of the impact of structure drawing thermal process at the fiber drawing tower on the distribution of the structure's refractive index. A discussion of group birefringence and chromatic dispersion measurement results is also provided.

The second part of the work is devoted to studies of the possibility of fiber nonlinearity control by the polarization of the in-coupled light. In particular, the work involves an optical fiber with nanostructured core forming an artificially anisotropic optical medium. A comparison between soft-glass and silica glass-based structures is provided with a discussion of both approaches' advantages and drawbacks. The research methodology embraces elaboration of own tools for numerical simulations of the fiber's nonlinear coefficient values and a detailed analysis of the polarization-dependent distribution of mode field guided in the fiber's nanostructured core. Technological aspects of the fabrication feasibility of such a fiber structure is also discussed.

The third part of the dissertation includes results on numerical simulation and experimental characterization of linear and nonlinear properties of anti-resonant hollow-core fibers. Due to light guidance in a hollow core and a small overlap of the guided mode with glassy cladding elements, anti-resonant fibers offer a large number of interesting transmission properties.



Among others, it is possible to obtain an ultrashort pulse transmission with negligible nonlinear or dispersion distortion. The presented results contain comprehensive studies on designing a standard and birefringent structure of anti-resonant hollow-core fibers for wavelength ranges covering mature laser and ultrafast fiber amplifier systems. Moreover, the spectro-temporal characterization of the ultrashort pulse transmitted in such fibers is presented and discussed.

Domènec Dohalowski

## Streszczenie

Rozprawa zawiera dyskusję wyników dotyczących kształtowania wybranych właściwości mikro- i nanostrukturalnych światłowodów specjalnych przeznaczonych do zastosowań w układach światłowodowych laserów do generacji ultrakrótkich impulsów. Kontekstem, w którym należy umiejscowić przeprowadzone badania jest zastosowanie światłowodów specjalnych w koherentnie zasiewanych ultraszybkich wzmacniaczach światłowodowych. Przedmiotem badań są dwa rodzaje światłowodów, wyróżnione na podstawie funkcji, jaką pełnią w układach wzmacniaczy światłowodowych. Pierwszy z nich to strukturalne światłowody przeznaczone do generacji koherentnego światła białego, tj. superkontinuum. W ich przypadku celem prac badawczych opisanych w rozprawie było opracowanie struktur charakteryzujących się wysoką nieliniowością optyczną typu  $\chi^{(3)}$ , płaską dyspersją chromatyczną w zakresie normalnym, a także wysoką dwójłomnością. Drugi rodzaj światłowodów rozwijanych w pracy stanowią światłowody antyrezonansowe z powietrznym rdzeniem. Tu celem było zaprojektowanie i eksperymentalna charakteryzacja wytworzonych światłowodów w kontekście transmisji szerokich spektralnie, ultrakrótkich impulsów laserowych ze zminimalizowaną deformacją spektralno-czasową spowodowaną dyspersją lub efektami nieliniowymi. Opisane w pracy badania dotyczą zatem zagadnień związanych z propagacją fal elektromagnetycznych w ośrodkach dielektrycznych, w warunkach bardzo silnego ograniczenia przestrzennego w dwóch wymiarach poprzecznych do kierunku propagacji oraz na odcinku znacznie przekraczającym wymiary poprzeczne ośrodka.

W pierwszej części rozprawy analizowane są całkowicie szklane światłowody, charakteryzujące się wysoką nieliniowością oraz dyspersją chromatyczną o wartościach należących całkowicie do zakresu normalnego. Rozdział zawiera wyniki projektowania, wytwarzania i charakteryzacji eksperymentalnej takich światłowodów. Optyczna nieliniowość światłowodów umożliwia proces poszerzenia spektralnego impulsów optycznych na szerokość pełnej oktawy. Proces generacji następuje przy pobudzaniu femtosekundowymi impulsami laserowymi o mocy szczytowej nieprzekraczającej dziesiątek kilowatów. Źródłem takich impulsów są kompaktowych rozmiarów lasery z synchronizacją modów o częstotliwości repetycji nie mniejszej niż dziesiątki MHz. Pozwala to na bezpośrednie zasiewanie wzmacniaczy światłowodowych pompowanych falą ciągłą. Z powodu ograniczonej mocy szczytowej takich źródeł, w tej części pracy badane są struktury światłowodowe wykonane ze szkła miękkich o wysokim nieliniowym współczynniku załamania. W ramach przeprowadzonych prac, rozwijane były własne narzędzia numeryczne służące projektowaniu światłowodów strukturalnych, wykorzystujące metodę elementów skończonych. Opracowany model numeryczny pozwala na uwzględnienie wpływu procesu termicznego wyciągania światłowodu na wieży światłowodowej na rozkład współczynnika załamania w strukturze światłowodu. Przedstawiona jest także dyskusja wyników pomiarowych dwójłomności grupowej i dyspersji chromatycznej.

Druga część pracy poświęcona jest badaniom nad możliwością kontroli nieliniowości światłowodu z użyciem polaryzacji wprowadzonego światła. W szczególności prace obejmowały analizę właściwości światłowodu z nanostrukturyzowanym rdzeniem, który stanowi ośrodek o sztucznej anizotropii optycznej. Porównywane są właściwości struktur wykonanych ze szkła miękkich oraz krzemionkowych, wraz ze wskazaniem zalet i wad obu rozwiązań. Metodologia badań zakładała opracowanie własnych narzędzi do symulacji

numerycznych wartości współczynnika nieliniowego światłowodu. Zaprezentowano także pogłębioną analizę rozkładu pola modu prowadzonego w nanostrukturyzowanym rdzeniu światłowodu w zależności od składowej polaryzacyjnej. Omówione są także technologiczne aspekty możliwości wytworzenia takiego światłowodu.

Trzecia część rozprawy zawiera opis wyników symulacji numerycznych i charakteryzacji eksperymentalnej liniowych i nieliniowych właściwości światłowodów antyrezonansowych z powietrznym rdzeniem. Dzięki prowadzeniu światła w powietrznym rdzeniu i małemu przekryciu prowadzonego modu ze szklanymi elementami płaszcza, światłowody antyrezonansowe oferują liczne możliwości związane z propagacją światła o określonych właściwościach. Wśród nich jest transmisja ultrakrótkich impulsów laserowych z pomijalnie małym zniekształceniem impulsu spowodowanym nieliniowością lub dyspersją. Zaprezentowane wyniki obejmują projektowanie standardowej oraz dwójłomnej struktury światłowodów antyrezonansowych z powietrznym rdzeniem. Światłowody posiadały okna transmisji odpowiadające długościom fali właściwym dla powszechnie stosowanych układów laserów i wzmacniaczy światłowodowych. Ponadto zaprezentowana i omówiona została spektralno-czasowa charakteryzacja ultrakrótkiego impulsu przesyłanego w takim światłowodzie.

Domènec Dobakowski