

Nonlinear phenomena of ultrabroadband radiation
in photonic crystal fibers and hollow waveguides

im Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation

vorgelegt von
Anton Husakou

Berlin, 2002

1. Gutachter: Prof. Dr. I. Hertel
 2. Gutachter: Priv.-Doz. Dr. D. Hennig
- Tag der Disputation: 28. Oktober 2002

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit auf der Basis der angegebenen Literatur selbständig verfasst habe.

Contents

1	Introduction	12
2	Theoretical fundamentals. Propagation equations	21
2.1	The propagation equation	21
2.1.1	Dispersion and nonlinear polarization	33
2.1.2	Self-phase modulation	38
2.1.3	Optical solitons in fibers	40
2.2	Propagation equation in fibers	45
2.2.1	Waveguiding model for a step-index fiber	46
2.2.2	Effective cladding model for PCF's	49
2.2.3	Dispersion in hollow fibers	52
2.2.4	Nonlinear term for propagation in fibers	54
2.3	Numerical procedure	56
3	Supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic crystal fibers	60
3.1	Solitons and broadening in different dispersion regimes	61
3.2	Comparison of spectral broadening for different input pulse durations	64

3.3	Interpretation of the results	67
3.4	Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons	72
4	Four-wave mixing in PCF's and tapered fibers	78
4.1	Phase-matching condition	79
4.2	Competition with supercontinuum generation by soliton fission.	82
4.3	Four-wave mixing for very low intensity and long pulses	87
4.3.1	Phase matching in dependence on fiber geometry	90
4.3.2	Numerical results	93
4.3.3	Influence of birefringence	95
5	Spectral broadening and ultrashort pulse generation in hollow fibers	100
5.1	Choice of pulse and waveguide parameters	101
5.2	Results of numerical simulation and discussion	104
6	Summary	112
7	References	115

Abstract

This work is a theoretical study of nonlinear optical phenomena with ultra-broadband radiation. For the description of these processes the standard method of nonlinear optics based on the slowly varying envelope approximation and Taylor expansion for the refractive index can not be applied. Here a generalized theoretical approach without these approximations is developed and used for the study of some interesting physical problems such as the generation of supercontinua in photonic crystal and hollow fibers.

Photonic crystal fibers (PCF's) are novel optical elements with peculiar linear and nonlinear properties. The ultrabroadband radiation, which arises in photonic crystal fibers from low-intensity pulses, was already used for exciting applications as e.g. frequency metrology. However, no theoretical explanation for the physical reasons of this unusually broad spectrum was given so far. In this work, supercontinuum generation is shown to be caused by a novel mechanism of spectral broadening through fission of higher-order solitons into redshifted fundamental solitons and blueshifted phase-matched nonsolitonic radiation. It is shown that this process is more effective for longer pulses than for shorter ones, which is in direct contrast with other spectral broadening mechanisms. This property can be used as evidence for this mechanism in experimental observations. The soliton dynamics is studied, and compared with experiments which show good agreement with the present theory.

Four-wave mixing plays an important role as another nonlinear process in PCF's. Its peculiarities are also investigated here. It is shown that phase-

matching of degenerate four-wave mixing can be achieved in an extremely broad frequency range reaching from IR to UV. Spontaneous generation of new frequency components and parametric amplification by four-wave mixing as well as possible overlap of this generation with soliton fission are studied in detail.

In addition, phase compensation and ultrashort pulse generation are studied in the case of the propagation of intense pulses through a gas-filled hollow fiber, in which a novel ultrawide self-phase-modulation-induced spectral-broadening regime is predicted with spectra covering almost 3 octaves for a optimized pressure.

Zusammenfassung in deutscher Sprache

In dieser Arbeit wurden nichtlineare optische Phänomene mit spektral ultrabreiter Strahlung theoretisch untersucht. Für die Beschreibung dieser Prozesse können die Standardmethoden der nichtlinearen Optik nicht verwendet werden, die auf der Näherung der langsam veränderlichen Einhüllenden und der Taylor Entwicklung der Brechzahl basieren. Hier wird ein verallgemeinerter theoretischer Ansatz ohne diese Näherungen entwickelt und für die Untersuchung einiger interessanter physikalischer Probleme verwendet, z.B. zur Erzeugung von Superkontinuumstrahlung in photonischen Kristall- und Hohlfasern.

Photonischen Kristallfaser (PCF) sind neuartige optische Faser mit besonderen linearen und nichtlinearen Eigenschaften. Spektral ultrabreite Strahlung, die aus Impulsen niedriger Intensität entsteht, wurde in faszinierender Anwendungen bereits verwendet, so z.B. in der Frequenzmetrologie. Aber es existierte bislang keine theoretische Erklärung für die physikalischen Ursachen des ungewöhnlich breiten Spektrums. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Erzeugung des Superkontinuums durch einen neuen Mechanismus der spektralen Verbreiterung durch den Zerfall von Solitonen hoher Ordnung zu rot-verschobenen fundamentalen Solitonen und blau-verschobener phasenangepasster nicht-solitonischer Strahlung verursacht wird. Es wird gezeigt, dass der Prozess effektiver für längere Impulse als für kürzere ist, im Gegensatz zu anderen Mechanismen der spektralen Verbreiterung; dies kann als Beweis für diesen Mechanismus bei der experimentellen Beobachtungen genutzt werden. Die Solitonendynamik wird untersucht, und ein Vergleich mit dem Experiment zeigt gute Übereinstimmung.

Die Vier-Wellen-Mischung spielt als ein weiterer nichtlinearer Prozess in

PCF eine wichtige Rolle, und ihre Besonderheiten in PCF werden ebenfalls untersucht. Es wird gezeigt, dass Phasenanpassung entarteter Vier-Wellen-Mischung in einem extrem breiten Frequenzbereich von IR bis UV erzielt werden kann. Spontane Erzeugung von neuen Frequenzkomponenten und parametrische Verstärkung durch Vier-Wellen-Mischung wie auch das Zusammenspiel mit dem Soliton-Zerfall werden im Detail untersucht.

Die Phasenkompensation und die Erzeugung von ultrakurzen Impulsen für die Ausbreitung von intensiven Impulsen in gas-gefüllten Hohlfasern wird weiterhin untersucht. Dabei wird eine neue ultrabreite durch Selbstphasenmodulation verursachte Spektralverbreiterung für einen optimierten Druck vorausgesagt mit einem Spektrum, das fast drei Oktaven überdeckt.

Acknowledgements

This work was done in the Max Born Institute for Nonlinear Optics and Short Pulse Spectroscopy with financial support of Deutsche Forschungsgemeinschaft by the project number He208317-2.

In the first place, I am truly thankful to Dr. J. Herrmann for giving me a chance to participate in this exciting research. This work would be impossible without his help, ideas, and comprehensive knowledge in the subject of nonlinear optics which he was always ready to share with me.

Special thanks to Dr. V. P. Kalosha for his advice and many, many productive discussions which contributed a lot to this work. I especially appreciate his help with numerical methods and optics of waveguides.

I thank Dr. Gr. Ya. Slepyan and Dr. S. A. Maksimenko for awakening my interest in physics in general and optics in particular, as well as for the knowledge and experience I obtained under their supervision in the Institute for Nuclear Problems in Minsk.

I would like to thank my supervisors, Prof. Dr. I. Hertel and Priv.-Doz. Dr. D. Hennig, as well as previous supervisor Prof. Gabriel for their interest in my work.

I would like to thank Dr. N. Zhavoronkov and R. Bernath for critical reading of the manuscript.

I thank V. Malyarchuk for his help with UNIX/Linux OS.

My thanks go to all colleagues from the A3 department of Max Born Institute who contributed to this work through advice and discussions.

Curriculum vitae

Name: Anton, Husakou

Date of birth: 25. Juni 1977

Place of birth: Minsk, Belarus

Citizenship: Belarus

Address: Max-Born-Institut, Max-Born-Str. 2a, D-12489 Berlin.

Tel. (030)6392-1248

E-mail: gusakov@mbi-berlin.de

Education

05/94	General school education	Liceum at Belarus State University, Minsk
-------	--------------------------	---

Higher education

09/94–06/99	Department of Physics	Belarus State University
06/99	Diploma in physics	

Professional experience

07/99–08/99	Juonior researcher	Institute for Nuclear problems, Minsk
since 09/99	PhD student	Max Born Institute, Berlin