

DISS. ETH No. 16393

**DISPERSION MANAGEMENT
AND CHARACTERIZATION**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

Presented by

ANASTASSIA GOSTEVA

Dipl. Eng.-Phys. (Moscow State Engineering Physics Institute,
Technical University)
born on August 27, 1977
citizen of Russia

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ursula Keller, Supervisor
Prof. Dr. Markus W. Sigrist, Co-Examiner

2006

Abstract

This thesis describes methods for ultrabroadband dispersion management and precise dispersion characterization of optical components for ultrashort laser pulses.

Dispersion sets limits in the generation, propagation and application of ultrashort pulses. The ability to control dispersion is essential for all ultrafast mode-locked lasers, especially when the pulse duration approaches the few-cycle regime. Dispersion is equally important for ultrashort pulse characterization techniques, pulse amplification, supercontinuum generation in fibers, and ultrabroadband pulse compression. Proper management and direct characterization of various optical components involved in the formation or propagation of ultrashort pulses is therefore necessary. Dispersion properties of chirped mirrors, Gires-Tournois interferometers (GTIs), photonic crystal fibers, vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers (VECSELs), or semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) have to be measured directly. Direct dispersion characterization is a valuable tool that provides a feedback to design and manufacturing.

Critical values in any dispersion characterization are the spectral resolution, accuracy of the measured dispersion and the measurement time. This thesis presents a comprehensive theoretical and experimental analysis of the relationship between the spectral resolution and the noise in the group delay dispersion data measured by scanning white light interferometry. It has been shown for the first time that the spectral resolution achieved in practice is limited, because the standard deviation of group delay dispersion is proportional to the third power of inverse spectral resolution; and for a specified accuracy the required number of averages (effective measurement time) scales with the sixth power of inverse spectral resolution. The influence of experimental parameters

such as spectral brightness, bandwidth of the light source, number of sampling points, number of averages, and detection noise is examined in detail. Two experimental setups for broadband dispersion measurement in visible/near-infrared and telecommunication spectral regions, as well as the improved data retrieval algorithm, are described.

Dispersion management is particularly challenging for the compression of ultrabroadband supercontinuum into pulses in the few-cycle regime. In the work reported in this thesis and in collaboration with the Politecnico di Milano, ultrabroadband back side coated (BASIC) dispersive mirrors with a bandwidth of 270 THz have been manufactured, characterized and successfully implemented for the compression of a cascaded hollow fiber supercontinuum down to a pulse duration of 4.6 fs with an energy of 20 μ J.

A novel technique for measuring the spectrally-resolved absolute phase difference between orthogonal optical modes has been demonstrated for the first time. The technique is based on the principles of scanning white-light interferometry with spectrally integrated detection and Fourier transform analysis. The phase difference is evaluated with milliradian precision from a nonlinear beat signal, occurring in the phase spectrum when independent interferograms, formed by individual modes, are recorded simultaneously. Although scanning white light Fourier transform interferometry is a linear technique in general, the nonlinear beat signal in the measured phase occurs due to spectral amplitude variation in each mode. Proof-of-principle absolute phase difference measurements were carried out with polarization modes and spatial fiber modes.

Kurzfassung

Diese Doktorarbeit beschreibt Methoden zum breitbandigen Dispersionsmanagement und zur präzisen Charakterisierung von optischen Komponenten für ultrakurze Laserpulse.

Dispersion setzt Grenzen für die Erzeugung, Ausbreitung und Anwendung von ultrakurzen Pulsen. Die Möglichkeit, Dispersion zu beherrschen, ist essenziell für alle moden-gekoppelten Ultrakurzpulslaser, insbesondere, wenn die Pulsdauer sich an das Regime weniger Pulszyklen annähert. Dispersion ist genauso bedeutsam für die Charakterisierung von kurzen Pulsen, zur Pulsverstärkung, zur Erzeugung von Superkontinuum und zur breitbandigen Kompression. Das richtige Dispersionsmanagement und die direkte Charakterisierung von verschiedenen optischen Komponenten, die zur Erzeugung oder bei der Ausbreitung von kurzen Pulsen verwendet werden, sind daher dringend erforderlich. Die Dispersionseigenschaften von dispersionskompensierenden Spiegeln, mikrostrukturierten Fasern, oberflächenemittierenden Halbleiterlasern, oder sättigbaren Halbleiterspiegeln müssen direkt bestimmt werden können. Die direkte Charakterisierung der Dispersion liefert wertvolle Information für das Design und die Herstellung.

Entscheidende Größen jeder Dispersionscharakterisierung sind die spektrale Auflösung, die Genauigkeit der Dispersionsmessung und die Messzeit. In dieser Doktorarbeit wird eine umfassende theoretische und experimentelle Analyse der Beziehung zwischen spektraler Auflösung und Rauschen in der Dispersionsbestimmung mittels Weisslicht-Interferometrie vorgestellt. Es wurde zum ersten Mal gezeigt, dass die erreichbare spektrale Auflösung in der Praxis limitiert ist, da die Standardabweichung der Gruppenverzögerungsdispersion proportional zur dritten Ordnung der inversen spektralen Auflösung ist; und für eine bestimmte Genauigkeit die notwendige Anzahl der gemittelten Werte

(effektive Messzeit) mit der sechsten Ordnung der inversen spektralen Auflösung skaliert. Der Einfluss von experimentellen Parametern wie spektrale Intensität, Bandbreite der Lichtquelle, Anzahl der Rasterpunkte, Anzahl der Mittelungen und Detektionsrauschen wird detailliert untersucht. Zwei experimentelle Aufbauten zur breitbandigen Dispersionsmessung im sichtbar/nahinfrarotem und im Telekommunikationsspektralbereich, sowie ein verbesserter Auswertungsalgorithmus werden beschrieben.

Dispersionsmanagement ist besonders anspruchsvoll für die Kompression eines breitbandigen Superkontinuums in das Regime weniger Pulszyklen. Im Rahmen dieser Doktorarbeit und einer Zusammenarbeit mit dem Politecnico di Milano wurden breitbandige, rückseitig beschichtete, dispersive Spiegel mit einer Bandbreite von 270 THz hergestellt, charakterisiert und erfolgreich eingesetzt für die Kompression eines Kaskaden-Hohlfaser-Superkontinuums zu einer Pulsdauer von 4.6 fs bei einer Energie von 20 μ J.

Eine neue Technik zur Messung der spektral aufgelösten absoluten Phasendifferenz zwischen orthogonalen optischen Moden wurde zum ersten Mal vorgestellt. Diese Technik basiert auf den Prinzipien der Weisslicht-Interferometrie mit spektral aufgelöster Detektion und Fourieranalyse. Die Phasendifferenz wurde mit einer Präzision im mrad-Bereich über eine nichtlineare Schwebung bestimmt, welche im Phasenspektrum auftritt, wenn unabhängige Interferogramme, die von den individuellen Moden geformt werden, simultan aufgezeichnet werden. Obgleich die Weisslicht Fourier-Interferometrie im allgemeinen eine lineare Technik ist, tritt wegen der Variation in der spektralen Amplitude jeder Mode ein nichtlineares Schwebungssignal auf. Zum Beweis dieses Messprinzips wurden experimentell absolute Phasemessungen mit Polarisationsmoden und räumlichen Fasermode demonstriert.