

Abstract

The dissertation is directed toward advancing the field of hard X-ray interferometry by contributing the development and characterization of interferometers. It is mainly concentrated on interferometers based on reflection and refraction of X-rays that are fabricated by MEMS technology in Si crystals. The development, characterization and application of three new interferometric schemes in the hard X-ray region are performed.

Understanding the spatial coherence properties of X-ray radiation is increasingly required for the design and manufacturing of x-ray optical elements, and for planning and analyzing experiments. Therefore, as one part of this work a new interferometric scheme based on the Young double slit technique was implemented in order to accurately characterize the transverse coherence at the beamline ID06 at the ESRF. The result of these measurements is expanded an understanding of sensitivity of interferometric techniques to the photon source size fluctuations at the low emittance storage rings. This technique allows measuring the source size with a very compact set-up.

The next scheme explored in this thesis is a multi-lens interferometer. Two interferometers, consisting of 30 and 6 lens arrays, were manufactured in Si crystals and experimentally tested. The tests have been performed over a wide energy range – from 12 to 64 keV.

Experimental results showed full agreement with theory which confirms that the quality of manufacturing is good enough to not contaminate interference patterns formed by interferometers based on refraction of X-rays.

The effective source size was determined with high precision by analyzing the fundamental Talbot image formed by the multi-lens interferometer using high photon energies. The particularity that an interference pattern is formed in the far field allows one to use this interferometer as a tool to diagnose the sphericity of the incident wavefront. In addition such lens array could be used as an advanced Shack-Hartmann wavefront sensor in focusing mode.

The possibility of forming a standing wave in paraxial geometry with variable period and maxima width opened up the new perspective of using this interferometer for the purpose of the investigation of nano objects without deposition on a flat surface (in contrast to the reflectivity or

diffraction based standing wave technique). The large depth of field of interference fringe (in comparison to the focal spot of the same size) expands experimental possibilities in using this interferometer for the transmission scanning microscopy and Moiré radiography of nanoscale objects.

Moreover, there is a group of potential applications related to the beam conditioning. This interferometer can be used as a beam expander or versatile illuminator to provide coherent illumination of large scale object on free electron laser X-ray sources (FELs) or ultimate storage rings.

Finally the lens array based interferometers may be used for phase contrast imaging.

Last, but not least, an interferometric scheme is a single crystal double mirror. It was discovered, during the study of the optical properties of multilens interferometers, that quality of the etched surface of structures is high enough to obtain total external reflection of X-rays. Therefore a bi – mirror interferometer consisting of two parallel channels was manufactured on the same Si chip as six-lens interferometer.

The sensitivity of the interference contrast to the angle of incidence was discovered and used to evaluate the surface roughness. As the two reflective surfaces are located in close proximity high contrast interference pattern can be observed with sources with poor spatial coherence. This opened up prospects of using such interferometers under the conditions of lab sources.

Streszczenie w języku polskim

Rozprawa doktorska dotyczy rozwoju zaawansowanych technik interferometrii z użyciem wysokoenergetycznego promieniowania rentgenowskiego, a jej celem jest budowa i charakteryzacja interferometrów nowej generacji. Rozprawę poświęcono interferometrom działającym na zasadzie odbicia i refrakcji promieniowania rentgenowskiego oraz wykonanym w kryształach krzemu przy użyciu technologii MEMS. W ramach pracy skonstruowano, przetestowano i scharakteryzowano trzy nowe interferometry stosowane do badań w zakresie wysokoenergetycznego promieniowania rentgenowskiego. Możliwość kontroli spójności przestrzennej promieni X ma podstawowe znaczenie w projektowaniu i budowie elementów optycznych, a także w planowaniu eksperymentu i analizie danych. Celem rozprawy była konstrukcja nowych interferometrów Younga z podwójną szczeliną do precyzyjnego (w skali mikronowej) określenia rozmiaru wiązki fotonów na linii ID06 w ESRF w Grenoble. Wyniki wykonanych pomiarów pozwalają lepiej zrozumieć czułość technik interferometrycznych na fluktuacje źródła fotonów w pierścieniu akumulacyjnym o niskiej emitancji.

W ramach pracy doktorskiej zaprojektowano również interferometry wielosoczewkowe. Dwa z nich zbudowane zostały na bazie kryształów krzemu, odpowiednio z 30 i 6 soczewek, oraz przetestowane w zakresie energii – od 12 do 64 keV. Wyniki eksperymentalne w pełni zgadzają się z modelem teoretycznym, co świadczy o odpowiedniej jakości skonstruowanych interferometrów, które nie zaburzają interferencji uzyskanej w wyniku refrakcji promieniowania rentgenowskiego. Rozmiar efektywnego źródła fotonów został wyznaczony z wysoką precyzją poprzez zastosowanie fundamentalnej analizy Talbota z użyciem interferometrów wielosoczewkowych i fotonów wysokiej energii. Szczególnym osiągnięciem opisanym w rozprawie jest możliwość wykorzystania opisanych interferometrów w celach diagnostycznych do badania sferyczności fali

padającej. Dodatkowo, soczewki takie mogą być wykorzystane jako zaawansowane czujniki typu Shack-Hartmann.

Co więcej, możliwość tworzenia równoległej fali stojącej o zmiennym okresie i szerokości maksimum daje nowe perspektywy badawcze nanoobjektów bez konieczności ich osadzania na powierzchniach płaskich (w odróżnieniu od techniki wykorzystującej fale stojące utworzone w wyniku dyfrakcji lub odbicia). Wysoka głębia ostrości skonstruowanych interferometrów poszerza zakres ich możliwości eksperymentalnych w zakresie zastosowania w badaniach nanoobjektów metodami Transmisyjnej Mikroskopii Skaningowej oraz radiografii Moiré. Interferometry takie mogą być również wykorzystane przy kondycjonowaniu wiązki promieniowania rentgenowskiego jako uniwersalne iluminatory obiektów o dużych rozmiarach w źródłach XFEL lub pierścieniach akumulacyjnych.

Interferometry wielosoczewkowe mogą mieć zastosowanie w technice obrazowania kontrastu fazowego. Interesującym przykładem jest tutaj interferometr monokrystaliczny z podwójnym zwierciadłem. W ramach niniejszej pracy eksperymentalnie dowiedziono wysoką jakość interferometrów wielosoczewkowych, które zdolne są do całkowitego odbicia promieni rentgenowskich. Na bazie tego samego monokryształu krzemu zbudowano dwa interferometry z podwójnym lustrem: z dwoma równoległymi kanałami oraz szescio-soczewkowy. Określono zależność czułości kontrastu interferencyjnego od kąta padania promieniowania, która może być użyta jako wyznacznik chropowatości powierzchni.

Opisane w ramach niniejszej pracy technologie i otrzymane wyniki otwierają nowe perspektywy użycia interferometrów w warunkach laboratoryjnych.