

Streszczenie

Technika ilościowych pomiarów fazowych (QPI) bazująca na równaniu transportu intensywności (TIE) wyróżnia się wśród znanych metod optycznych ze względu na prostą implementację eksperymentalną, odporność na zakłócenia zewnętrzne oraz możliwość realizacji pomiarów w świetle częściowo koherentnym. Na przestrzeni lat zaproponowano szereg algorytmów numerycznych techniki QPI-TIE, tak aby uzyskany pomiar charakteryzował się konkurencyjną i wysoką dokładnością. Kluczowymi składnikami dokładności metody są: kwantyfikacja błędu, skuteczność minimalizacji szumu oraz odpowiednia manipulacja koherencją oświetlenia. Niestety w literaturze naukowej brak jest rozwiązań analitycznych dla tych problemów. Konsekwentnie brak jest również narzędzi numerycznych, co odzwierciedla się w raczej wąskim praktycznym zastosowaniu techniki QPI-TIE. W związku z tym, przedmiotem tej pracy doktorskiej jest rozwiązanie szeregu ograniczeń, tak, aby QPI-TIE stała się praktycznym i wydajnym narzędziem pomiarowym.

Aby osiągnąć zamierzony cel, w pracy zaproponowano podstawy nowatorskiej metodyki pomiarowej QPI-TIE umożliwiając poprawienie jej aspektów praktycznych. Skoncentrowano się na trzech głównych zagadnieniach: matematycznej bazie kwantyfikacji błędu rekonstrukcji fazy, analizie wpływu warunków brzegowych oraz uwzględnieniu wpływu funkcji transferu kontrastu na rekonstruowaną fazę. Podczas realizacji pracy opublikowano cztery artykuły w czasopismach JCR, jedną publikację z listy ESCI i sześć recenzowanych komunikatów konferencyjnych, które koncentrują się na wyżej wymienionych aspektach. Niniejszy przewodnik stanowi tło i podsumowanie badań.

Istotną cechą opracowanej metodologii QPI-TIE jest uzyskanie rekonstrukcji fazy z minimalnym błędem i najwyższą rozdzielczością przestrzenną. Spośród szeregu zaproponowanych narzędzi numerycznych na szczególną uwagę zasługuje nowy algorytm rekonstrukcji fazy bazujący na TIE. Algorytm jest łatwy w implementacji, ma zwiększoną dokładność, wykorzystuje wydajny scenariusz rejestracji danych o nierówno odległej separacji, może pracować w oświetleniu częściowo koherentnym oraz pozwala na rekonstrukcję fazy w szerokim zakresie częstotliwościowym. Ponadto zaproponowano szereg technik pozwalających na przełamanie barier klasycznego podejścia TIE. Rozwiązania te bazują na manipulacji kluczowymi parametrami wiązki oświetlającej: pochyleniem, koherencją i sferycznością.

Słowa kluczowe: Ilościowe obrazowanie fazowe, równanie transportu intensywności, rekonstrukcja fazy, jednowiązkowa mikroskopia fazowa, algorytmy uciążlania fazy

Abstract

Quantitative Phase Imaging (QPI) based on the transport of intensity equation (TIE) has drawn the attention in optical metrology due to the straightforward implementation, robustness against environmental perturbations, and the flexibility to employ partially coherent illumination (PCI). With the aim to reach high accuracy of the phase measurement, QPI-TIE based algorithms have become more and more sophisticated through the years. However, conceptual problems regarding the quantification of the error, efficient noise suppression, and manipulation of the PCI has not been addressed satisfactorily yet. In the current literature, the analytical formulation of these problems is not well defined and their importance is often underestimated or ignored. As a consequence, TIE methodology lacks of proper tools that allow an efficient implementation of this QPI technique. Hence, the subject of this thesis is to make the QPI-TIE technique a practical and efficient measurement tool.

In order to accomplish this objective, the thesis lays the foundation for a new methodology, which improves the applicability of the QPI-TIE technique by focusing on three major aspects: a solid mathematical frame that allows the proper quantification of the error in QPI-TIE techniques, the analysis of the boundary condition and the inclusion of the Contrast Transfer Function model into the TIE methodology for improving the performance of the QPI-TIE solver. The thesis presents four papers published in JCR journals, one paper published in the ESCI list and six peer-reviewed conference proceedings that address the mentioned goals and provides the corresponding solutions. Moreover, a publication guide makes the necessary background and a brief summary of the research.

Finally, this thesis provides the proper methodology that guarantees phase retrieval with a minimum error and the best frequency resolution. Among several algorithmic solutions developed in this thesis, a novel QPI-TIE solver is shown. The algorithm is easy to implement, has an increased accuracy in the retrieved phase when using non-equidistant plane separations, can employ partially coherence illumination, and can recover a wide frequency components of the phase. In addition, a series of techniques that break the limits of the classical TIE approach are proposed. These solutions are given in the context of manipulating key parameters of the incoming beam: tilting, coherence and sphericity of the illumination.

Keywords: Quantitative phase imaging, transport of intensity equation, phase reconstruction, single beam phase microscopy, algorithms for phase unwrapping.