

dr. hab. Paweł Korecki
Zakład Promieniowania Synchrotronowego
Instytut Fizyki, Wydział FAIS
Uniwersytet Jagielloński
e-mail: pawel.korecki@uj.edu.pl
tel: +48 12 664 4627



Kraków 26.02.2016

Instytut Fizyki

im.

Mariana Smoluchowskiego

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mikhaila Lyubomirskiy'ego
p.t. "High energy inline interferometry based on refractive optics"

Rozprawa „High Energy in line interferometry based on refractive optics” autorstwa pana Mikhaila Lyubomirskiy'ego została złożona na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej. Promotorem pracy jest dr Anatoly Snigirev a kopromotorem dr hab. inż. Agnieszka Witkowska. Dziedziną pracy jest fizyka. Jest to praca eksperymentalna dotycząca optyki rentgenowskiej a w zasadzie koherentnej optyki rentgenowskiej, której rozwój (a na pewno renesans) wiąże się z powstaniem synchrotronowych źródeł promieniowania synchrotronowego trzeciej generacji. Badania doświadczalne opisane w pracy zostały przeprowadzone właśnie w ośrodku synchrotronowym tego typu czyli w European Synchrotron Radiation Facility w Grenoble. Praca jest na wysokim poziomie naukowym. Opisuje ona proste koncepcyjnie eksperymenty optyczne, które jednak dla zakresu twardego promieniowania X są trudne i nowatorskie. Część materiału rozprawy została opublikowana niezależnie w dwóch artykułach w czołowych czasopismach optycznych:

- Snigirev, I. Snigireva, M. Lyubomirskiy, V. Kohn, V. Yunkin, S. Kuznetsov, X-ray multilens interferometer based on Si refractive lenses. Optics Express 22, 25842-25852 (2014)
- M. Lyubomirskiy, I.Snigireva, S. Kuznetsov, V.Yunkin, A.Snigirev, Hard x-ray single crystal bi-mirror. Optics Letters 40 ,2205-2208 (2015).

Praca napisana jest w języku angielskim. Nie czuje się kompetentny by ocenić jakość języka angielskiego użytego w pracy. Jednak w wielu miejscach zauważyłem drobne błędy gramatyczne. Tylko w kilku przypadkach utrudniły one zrozumienie sensu poszczególnych zdań. Krótką listę błędów umieściłem w odrębnym dodatku. Ogólnie, edycja pracy jest staranna a rysunki w pracy są czytelne i dobrze opisane. Lista referencji jest wyczerpująca.

Pierwsze cztery rozdziały pracy omawiają podstawowe zagadnienia optyki rentgenowskiej. W rozdziale 1 omówione jest bardzo krótko oddziaływanie promieniowania X z materią. Rozdział 2 to opis urządzeń do wywarzania promieniowania rentgenowskiego oraz refrakcyjnych soczewek rentgenowskich. Na marginesie: promotor rozprawy w głośnej pracy z 1996 zademonstrował po raz pierwszy możliwość użycia takich soczewek dla promieniowania X a niniejsza praca jest rozwinięciem badań nad takimi soczewkami. Rozdział 2 zawiera również opis

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-47-03

fax +48(12) 664-49-06

e-mail: fizyka@uj.edu.pl

wytwarzania mikrostruktur krzemowych technikami litografii elektronowej oraz „suchego” trawienia. Rozdział 3 to krótki skalarny opis dyfrakcji z uwzględnieniem zjawiska samo-obrazowania obiektów periodycznych czyli efektu Talbota. W rozdziale 4 wprowadzone są podstawowe zagadnienia związane z koherencją oraz dyskutowane są podstawowe typy interferometrów. Część wstępna pracy zawiera zarówno informacje powszechnie znane jak i bardziej specjalistyczne, na które Autor powołuje się w opracowaniu wyników. Część wstępna została napisana w kontekście wyników omawianych w następujących rozdziałach. W zasadzie jedyna uwaga krytyczna wiąże się z rysunkiem 2.2 pracy, który został przerysowany z książki J. Als-Nielsen i D. McMorrow, *Elements of Modern X-ray Physics* i ilustruje schemat lamp rentgenowskich oraz generowanego widma promieniowania. W pewnym sensie rysunek jest zbędny gdyż Autor w pracy wykorzystuje tylko promieniowanie synchrotronowe. Z drugiej strony widmo emisji promieniowania X na rysunku 2.2 jest w sposób niezwykle dziwny zniekształcone. W rzeczywistości widmo promieniowania hamowania można opisać bardzo prostą funkcyjną zależnością.

Rozdziały 5-7 to opis wyników uzyskanych przez Autora. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę, że tytuł rozprawy nie w pełni odzwierciedla jej zawartość. Badania opisane w pracy nie ograniczają się do optyki refrakcyjnej. Obejmują one także, badania nad optyką odbiciową i prosty interferometr Younga. Nie jest to uwaga krytyczna a raczej pochwała. Przy okazji wspomnę jednak, że polska wersja abstraktu we fragmencie dotyczącym efektu Talbota zawiera błędne tłumaczenie. Niedokładnie przetłumaczone jest też zdanie dotyczące interferometru z podwójnym lustrem.

Rozdział 5 poświęcony jest opisowi wyników uzyskanych przy pomocy skonstruowanego przez Autora przestrajalnego interferometru Younga składającego się z dwóch mikro-apertur (pinholi). Autor pokazuje, że w ten prosty interferometr w kombinacji z soczewkami refrakcyjnymi może być użyty do interferometrycznych pomiarów efektywnego rozmiaru źródła synchrotronowego i wyciąga wnioski, że przestrajalność pozwala na pomiary rozmiaru źródeł w zakresie od mikrometrów do milimetrów. Wyniki porównane są z wynikami uzyskanymi przy pomocy bardziej zaawansowanego elementu optycznego tj. interferometru dwusoczewkowego.

Rozdział 6 to opis badań nad interferometrami wielosoczewkowymi umieszczonymi na jednym chipie krzemowym. W odróżnieniu od interferometru Younga te elementy optyczne cechują się dużą złożonością. W jednym „waflu” krzemowym zostały wykonane interferometry składające się z sześciu i trzydziestu złożonych mikro-soczewek (compound lenses). Każda złożona soczewka składała się z od 10 do ok. 250 pojedynczych soczewek refrakcyjnych i pozwala na uzyskanie tej samej ogniskowej w bardzo szerokim zakresie energii od 10 do 50 keV. Obliczenia dotyczące działania interferometrów zostały przeprowadzone w oparciu o teorię efektu Talbota. W obliczeniach Autor uzyskał pomoc od dr. Victora Kohna, cenionego eksperta w tej dziedzinie. Pokazano, że wytworzone interferometry są w stanie uzyskać kontrast na poziomie 90% i pozwalają na uzyskanie pików interferencyjnych o znacznie mniejszej szerokości niż dla interferometru dwusoczewkowego. Dokładnie została omówiona jakościowa różnica w interferogramach powstających z użyciem systemu dwu i wielosoczewkowego. Szkoda, że w pracy nie dokonano pomiaru tzw. dywanu Talbota. Dokładniejsze pomiary obrazów interferencyjnych w zależności od położenia na osi optycznej mogłyby dostarczyć bardziej szczegółowej informacji o wytworzonych układach soczewek.

Rozdział 7 przedstawia interferometr dwulustrzany, który jest w zasadzie działania bardzo zbliżony do interferometru Younga opisywanego wcześniej. W pracy, Autor przedstawia interferometr dwulustrzany w geometrii pionowej uzyskany w procesie planarnej mikro-strukturyzacji substratu krzemowego i pozwalający na uzyskanie prążków interferencyjnych o dużym kontraście. Co ważne interferometr wytworzony został na tym samym chipie krzemowym co interferometry wielosoczewkowe. Jednym z głównych parametrów ograniczającym efektywną aperturę złożonych soczewek (oprócz absorpcji) jest szorstkość ich powierzchni. Wytworzony interferometr dwulustrzany w sposób niezwykle bezpośredni pozwala na wyznaczenie szorstkości powierzchni pionowych wytwarzanych technikami trawienia i litografii. Pozwoli to w przyszłości na optymalizację procesów wytwarzania mikrosoczewek i interferometrów soczewkowych.

Po koniec każdego rozdziału, Autor w sposób niezwykle przejrzysty streszcza uzyskane wyniki i przedstawia możliwe zastosowania wytworzonych i scharakteryzowanych interferometrów: od pomiarów efektywnych rozmiarów źródeł i ich spójności poprzez obrazowanie z kontrastem fazowym do litografii rentgenowskiej. Dlatego jestem pewien, że badania przedstawione w pracy stanowią istotny wkład do optyki rentgenowskiej. Ponieważ rozprawa została napisana w języku angielskim, angielską wersję recenzji wraz listą drobnych usterek przesyłam jako odrębny załącznik.

Podsumowując, pierwsza część rozprawy zawiera opis wybranych zagadnień z zakresu współczesnej optyki rentgenowskiej a jej drugą część opisuje postępy we współczesnej optyce rentgenowskiej. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie pana Mikhaila Lyubomirskiy'ego do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz o wyróżnienie Jego rozprawy doktorskiej.



Paweł Korecki

Review of Ph.D thesis
“High energy inline interferometry based on refractive optics”
by Mikhail Lyubomirskiy

The thesis „High Energy in line interferometry based on refractive optics” authored by Mikhail Lyubomirskiy was submitted to Faculty of Technical Physics and Applied Mathematics of Gdańsk University of Technology. The thesis was written under the supervision of Dr. Anatoly Snigirev. The co-supervisor of the thesis was Dr. hab. ing. Agnieszka Witkowska. The scientific discipline of the thesis is physics and the thesis is devoted to x-ray optics, or specifically, to coherent x-ray optics. The progress of coherent x-ray optics was greatly stimulated by the construction of 3rd generation synchrotron facilities. The experiments reported in the thesis were conducted at such a facility i.e. at the European Synchrotron Radiation Facility in Grenoble. The thesis is on a high scientific level. It reports on conceptual very simple experiments, which however at hard x-ray energies are difficult and novel. Part of the material of the thesis was, independently, published in the top-ranked optical journals:

- Snigirev, I. Snigireva, M. Lyubomirskiy, V. Kohn, V. Yunkin, S. Kuznetsov, X-ray multilens interferometer based on Si refractive lenses. *Optics Express* 22, 25842-25852 (2014)
- M. Lyubomirskiy, I. Snigireva, S. Kuznetsov, V. Yunkin, A. Snigirev, Hard x-ray single crystal bi-mirror. *Optics Letters* 40, 2205-2208 (2015).

The thesis was written in English. Unfortunately, I am not able to precisely evaluate the quality of English used in the thesis. In general, the thesis was written with care and the figures are clear and well described. It includes a comprehensive list of references. However, I have noticed minor typographical and grammatical mistakes. Only at few points, these errors influenced the readability of the thesis. A list of minor mistakes is attached in a separate appendix.

Chapters 1-4 describe basic aspect of x-ray optics. Chapter 1 explains the interaction of x-rays with matter. Chapter 2 entitled “Instrumentation” describes x-ray sources and x-ray refractive lenses. It is worthy to note, that the supervisor of the thesis, in an experiment from 1996, for the first time demonstrated the possibility to construct refractive lenses for hard x-rays and the submitted thesis is a continuation of that work. Chapter 2 also contains a description of electron lithography and dry etching methods for fabrication of micro-lenses. Chapter 3 presents a short scalar description of diffraction with an emphasis on the self-imaging effect i.e. the Talbot effect. Aspects of the coherence theory and basic types of x-ray interferometers are described in Chapter 4. The introductory part discusses both basic and more advanced aspects of x-ray optics and was written in the context of results sections. In fact the only one critical comment to this part of the thesis is related to Fig. 2.2, which was re-drawn from a book by J. Als-Nielsen and D. McMorrow, *Elements of Modern X-ray Physics*. This figure illustrates a scheme of two types of x-ray tubes and their emission spectra. In fact, since Author uses synchrotron radiation this figure is redundant. On the other hand, the presented spectrum is in a very strange way

distorted. In fact Bremsstrahlung has a very well defined simple functional dependence.

Chapters 5-7 present the main results of the thesis. It is worthy to note that the title of the thesis does not fully reflect the content. In fact, studies are focused on refractive optics but go beyond discussion of this kind of optics. Thesis also describes simple Young interferometer and a reflective bi-mirror interferometer. By the way: Polish version of the abstract contains wrong translation in the fragment on the Talbot effect. In addition the sentence on bi-lens interferometer is also a bit incorrect.

Chapter 5 describes results obtained using the tunable double pinhole interferometer. Author shows that this simple interferometer, in combination with compound refractive lenses, can be used for efficient determination of the effective size of the synchrotron source. He concludes that the tunability of the interferometer enables such measurements for a wide range of source sizes from micrometers to millimeters. The results are compared with data from experiment that used a more complex x-ray optical element i.e. the bi-lens interferometer.

Chapter 6 demonstrates a study on multi-lens interferometers fabricated on a single silicon chip. Contrary to the double-pinhole interferometer, this very advanced optical device has a complex structure. On a single silicon chip, Author designed six and thirty lens interferometers. Each compound lens, consisted from 10 to 250 biconcave refractive lenses that enabled to obtain constant focal length for a wide energy range from 10 to 50 keV. Calculations that supported the experimental data were performed based on the Talbot effect formalism. Calculations were performed with a help from Dr. Victor Kohn, an expert in the field. It was shown that the designed interferometer is capable to provide a 90% contrast and lead to a formation of much narrower interference peaks, as compared to the bi-lens interferometer. Author underlines the fundamental qualitative differences (longitudinal dependence of the interference patterns) between interferograms from bi-lens and multi-lens systems. Therefore, in my opinion, this part of the thesis would greatly benefit from measurements of the so called Talbot carpet, which could permit a more quantitative analysis of the designed multi-lens systems.

Chapter 7 discusses the bi-mirror interferometer. The working principle of this interferometer is very similar to the Young interferometer described previously. This interferometer was designed in a vertical geometry using a planar micro-structuring method and enables to obtain interference fringes with a high contrast. Most importantly, it was manufactured on the same chip as the multi-lens system. Roughness of the vertical surfaces produced using planar e-lithographic and dry etching technology is one of the main factors (together with absorption) that limit the effective numerical aperture of compound refractive lenses. The designed interferometer, in a tricky and a very straightforward way enables to measure the roughness. This provides a direct means for optimization of the fabrication process.

At the end of each chapter, Author describes possible practical applications of the designed interferometers. Without doubts the possible application are very broad: from effective source size measurement and coherence characterizations through phase-contrast imaging to x-ray lithography. Therefore, I am sure that the submitted thesis is a substantial contribution to x-ray optics. A list of minor critical comments can be found in a separate appendix.

Concluding, the first part of the thesis in a brief way presents interesting aspects of modern x-ray optics, whereas the second part demonstrates advances in modern x-ray optics. Therefore, in my opinion the thesis meets all requirements of a dissertation in the field of physics and I recommend its approval to the public defense. Moreover, I recommend to award the thesis with the prize for an outstanding thesis.

Paweł Korecki

ZAŁĄCZNIK 2: Lista drobnych usterek
APPENDIX 2: List of minor comments

- 1) Polish Abstract: the sentence "...by analyzing the fundamental Talbot image " should be translated as" ... poprzez analizę podstawowego obrazu Talbota ..." and not as "... poprzez zastosowanie fundamentalnej analizy Talbota" . It discusses Talbot image at the distance z_T , as defined by Eq. 3.15.
- 2) Polish Abstract: the sentence "... Therefore a bi – mirror interferometer consisting of two parallel channels ..." should be translated as "Dlatego, podwójny interferometr zbudowany z dwóch równoległych kanałów ..."
- 3) Page 12: In the sentence: "The absorption is denoted by the imaginary part β and it is 3 orders of magnitude smaller than δ ." Author should add "for silicon". Otherwise this sentence is just wrong.
- 4) Page 56: Pt L edge is at 13.3keV (not at 19.3 keV) – simple typographic error. BTW: above the edge (up to 20keV) absorption is also almost 99%.
- 5) Page 90: "Figure 8.3" should read "Figure 7.3"

Examples of grammatical/typographic mistakes:

- 6) Page 10: "does not allows"
- 7) Page 11: double occurrence of "influence" in a sentence of the last paragraph.
- 8) Page 25: The sentence: "At the moment CRL are producing from Be, Al, Si, Ni and Carbon based materials." is grammatically incorrect.
- 9) Page 26: The sentence: "The focal length of single double concave lens is denotes:..." is grammatically incorrect.
- 10) Page 28: The sentence: "The numerical aperture N.A. is directly depends on..." is grammatically incorrect.
- 11) Page 51: "denotes as" should read "denoted as".
- 12) Page 56: The sentence: "Therefore, this distance may be neglected and assumes that apertures are located in the same position relative to the source" is grammatically incorrect.
- 13) Page 59: Last sentence: "large" should read "larger".
- 14) Page 63: The sentence: "The variable distance between holes got raises the sensitivity ..." is grammatically incorrect.
- 15) Page 65: The sentence: "It was manufactured two sets of multilens interferometers, ..." is grammatically incorrect.
- 16) Page 71: The first two sentences in the last paragraph are hardly possible to understand
- 17) Page 73: "visibility was approximates 0.73" - grammatically incorrect