

Prof. dr hab. Czesław Kapusta  
Katedra Fizyki Ciała Stałego  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

5.01.2018.  
POLITECHNIKA GDAŃSKA  
WYDZIAŁ FIZYKI TECHNICZNEJ  
I MATEMATYKI STOSOWANEJ  
Wpłynęło dnia 20.02.2018  
L. dz. 6/WFTiMS/SN/2018  
Zat. —

**Opinia o rozprawie doktorskiej pana Petra Ershov'a  
pod tytułem „High resolution X-ray diffractometry and reflectometry of  
semiconductor nano- and microstructures based on X-ray refractive optics”**

Przedstawiona do ponownej recenzji uzupełniona rozprawa doktorska, której autorem jest pan Petr Ershov, została zrealizowana w European Synchrotron Radiation Facility w Grenoble, Francja. Promotorem rozprawy jest dr Anatoly Snigirev z ESRF Grenoble, a drugim promotorem – dr hab. Anna Perelomova z Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej, którego Rada prowadzi niniejszy przewód doktorski. Przedmiotem rozprawy jest zbadanie nano- i mikrostruktur półprzewodnikowych nowoczesnymi metodami dyfraktometrii i reflektometrii rentgenowskiej wysokiej rozdzielczości wykorzystującymi optykę refrakcyjną na wiązce promieniowania synchrotronowego. Rozprawa jest napisana w języku angielskim i składa się z pięciu rozdziałów poprzedzonych wstępem, a zakończona jest listą używanych skrótów, wykazem dorobku Doktoranta i liczącym 64 pozycje spisem literatury (w poprzedniej wersji 51). Całość mieści się na 86 stronach druku (poprzednio 50 stron). Jest zilustrowana 70 rysunkami i wykresami (poprzednio 37), a część wyników liczbowych zamieszczona jest w 9 tabelach (wcześniej 7). Dołączone materiały zawierają streszczenie rozprawy w języku polskim oraz listę wprowadzonych zmian

We wprowadzeniu Autor sformułował ogólny cel rozprawy jako „modernizację istniejących metod HRXRD (wysokorozdzielcza dyfrakcja rentgenowska) i XRR (reflektometria rentgenowska) dla obecnych źródeł synchrotronowych w kierunku

zwiększenia ich rozdzielczości: kątowej, przestrzennej i czasowej”. Określił także następujące szczegółowe cele pracy:

1. Przeanalizowanie konwencjonalnych wysokorozdzielczych metod dyfraktometrii i reflektometrii,
2. Zaprojektowanie i wdrożenie alternatywnego schematu optycznego wysokorozdzielczej dyfraktometrii i reflektometrii rentgenowskiej.
3. Przeprowadzenie eksperymentów i obróbki danych dla otrzymania wyników ilustrujących zalety nowych metod.

Zaplanował również eksperymentalne zbadanie proponowanych rozwiązań w układzie zespolonych soczewek refrakcyjnych (Compound Refractive Lenses) z transformatą Fouriera dla wysokorozdzielczej dyfraktometrii rentgenowskiej oraz w układzie interfero-reflektometru dla reflektometrii w zakresie twardego promieniowania X.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do tematyki źródeł promieniowania X i optyki rentgenowskiej. Autor omawia w nim pokrótce nowoczesne źródła tego promieniowania – synchrotrony kolejnych generacji – oraz podaje szczegóły budowy i zasady działania zespolonych soczewek refrakcyjnych oraz optyki fourierowskiej. W rozdziale drugim przedstawione są podstawy teoretyczne dyfraktometrii i reflektometrii rentgenowskiej oraz tradycyjne metody prowadzenia badań tymi technikami. Rozdział trzeci przedstawia szczegóły „rentgenowsko-optycznego” podejścia do dyfraktometrii i reflektometrii wysokiej rozdzielczości stosowanego przez Autora. W rozdziale czwartym, najobszerniejszym ze wszystkich, zawarty jest opis stanowiska pomiarowego oraz szczegóły dotyczące badanych próbek i prowadzonych eksperymentów, prezentacja wyników przeprowadzonych badań i ich analizy. Rozdział piąty zawiera wynikające z nich wnioski oraz perspektywy.

Zaproponowane rozwiązania zostały zrealizowane na stanowisku ID06 w ESRF, Grenoble, wykorzystującym promieniowanie undulatora o wysokiej intensywności i koherencji przestrzennej. Pomiary w układzie zespolonych soczewek refrakcyjnych z transformatą Fouriera wykonano dla nano-heterostruktury krzemowo-germanowej

przygotowanej metodą analogiczną do używanej w technologii BiCMOS 130 nm. Struktura ta składała się z kwadratowej matrycy słupków krzemowych (średnica 90 nm, wysokość 150 nm, odstęp 360 nm) na Si(001) z naniesionymi na nie „kryształkami” Ge o średnicy 100 nm. Eksperymenty wykonywano w geometriach „soczewki przed obiektem” i „soczewki za obiektem”. Autor prezentuje uzyskane obrazy dyfrakcyjne i analizuje ich składowe fourierowskie otrzymując bardzo wysoką wartość rozdzielczości w przestrzeni odwrotnej, wyższą dla geometrii „soczewki za obiektem”. Rozdzielczość ta kilkukrotnie przewyższa uzyskaną w technice klasycznej dla takich próbek.

Eksperymenty reflektometryczno – interferometryczne zostały przeprowadzone na membranach z azotku krzemu o nominalnych grubościach 200, 500 i 1000 nm. Układ 71 berylowych zespolonych soczewek refrakcyjnych pozwolił zogniskować promieniowanie rentgenowskie na próbce do obszaru o wymiarach  $2.8\ \mu\text{m}$  w kierunku poziomym i  $0.2\ \mu\text{m}$  w pionie. Przeprowadzone pomiary pokazały, że metoda HXRI pozwala analizować grubość membran lokalnie, w skali przestrzennej ok.  $40\ \mu\text{m}$  i kątowej rzędu  $6\ \mu\text{rad}$ . Są to w obu przypadkach rozdzielczości kilkadziesiąt razy lepsze od osiągniętych w konwencjonalnej metodzie XRR, a czas pomiaru – dwa rzędy wielkości krótszy. Metoda HXRI (interferometria twardego promieniowania X) została także wykorzystana przez Autora rozprawy do zbadania procesu degradacji folii PMMA o grubości 100 nm, *in situ*, pod wpływem promieniowania rentgenowskiego. W obszarach odpowiadających największej intensywności padającego promieniowania zostało zaobserwowane stopniowe zmniejszenie gęstości związane z depolimeryzacją materiału oraz pojawienie się „nierówności” warstwy.

Wyniki przedstawione w rozprawie pokazują, że Autorowi udało się osiągnąć założony cel i zaplanowane cele cząstkowe. Należy tutaj podkreślić, że było to możliwe dzięki temu, że prowadził swoje prace w grupie o światowej renomie w dziedzinie badań dyfrakcyjnych, pod opieką promotora mającego wielkie osiągnięcia w rozwijaniu optyki rentgenowskiej, w tym zespolonych soczewek refrakcyjnych. Pan

Petr Ershow jest współautorem trzech publikacji, których wyniki wchodzą w skład rozprawy, a także siedmiu innych prac oraz patentu. Wyniki swoich badań prezentował na czterech konferencjach międzynarodowych.

Uzupełnienia wprowadzone przez Autora w stosunku do poprzedniej wersji, dotyczące zarówno wprowadzenia do tematyki rozprawy, wykorzystywanej teorii i aparatury, jak i specyfiki stosowanych metod pomiarowych, czynią rozprawę bardziej kompletną, a poprawiona szata graficzna – znacznie lepiej czytelną. Uwadze Autora umknęło jednak sporo błędów typograficznych, np. *angels* zamiast *angles*, (str. 11 akapit 1), czy *form* zamiast *from* (str. 12, akapit 1). Podpisy pod rysunkami 66 i 68 przesunęły się na następne strony, a na str. 52 szerokość i wysokość szczelin jest podana jako 1000 mm. Załączone streszczenie rozprawy po polsku wymaga korekty językowej.

Rozprawa prezentuje bardzo wysoki poziom merytoryczny, a wymienione powyżej usterki nie podważają tej oceny. Przedstawione w niej badania stanowią ważny krok w kierunku trójwymiarowej charakteryzacji kryształów, w tym rentgenowskiej mikroskopii ciemnego pola. Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej Autora, pana Petra Ershov'a do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Biorąc pod uwagę poziom naukowy przedstawionych w rozprawie badań i ich duże znaczenie dla dalszego rozwoju metod dyfrakcyjnych stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

