

Regular Contribution

Działalność Naukowa Pracowni Spektroskopii Optycznej Półprzewodników Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Udział w badaniach z zastosowaniem promieniowania synchrotronowego

A. Kisiel*

Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego, Uniwersytet Jagielloński, ul. prof. St. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

*e-mail: andrzej.kisiel@uj.edu.pl

Wprowadzenie

Odbudowanie fizyki doświadczalnej w Uniwersytecie Jagiellońskim po zniszczeniach II wojny światowej było priorytetem prof. H. Niewodniczańskiego, który po objęciu w roku 1946 II Katedry Fizyki Doświadczalnej zorganizował i istotnie ożywił działalność naukową.¹ Jako uznany w świecie naukowym badacz w zakresie spektroskopii atomowej, w kierowanej Katedrze Fizyki Doświadczalnej (KFD), przemianowanej w połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia na Zakład Fizyki Doświadczalnej (ZFD), proponował zwykle nowo przyjętym współpracownikom podjęcie badań naukowych w dziedzinie spektroskopii atomowej. Autor tego artykułu, przyjęty w roku 1953 na asystenturę w KFD, również otrzymał taką propozycję. Dotyczyła ona podjęcia badań stosunków natężeń w multipletach linii widmowych wodoropodobnych jonów aluminium i krzemu tzn. jonów z jednym elektronem walencyjnym.



Rysunek 1. Profesor H. Niewodniczański.

Po zakończeniu przewidywanego programu badań rozprawą doktorską i publikowanymi artykułami², szczególne zainteresowanie naukowe autora artykułu wzbudzało, rozpoczęte w Europie i USA w połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku, eksperymentalne analizowanie struktury elektronowej pasma walencyjnego i pasma przewodnictwa ciał stałych przy użyciu metod spektroskopii optycznej³. Badania te dostarczały fundamentalne informacje o strukturze elektronowej ciał stałych. Okazały się szczególnie cenne przy zbieraniu informacji o strukturze elektronowej pasm walencyjnego i przewodnictwa germanu⁴ i krzemu⁵, robiących wówczas oszołamią karierę w elektronice,

jako podstawowe materiały półprzewodnikowe do wytwarzania tranzystorów. Zainteresowanie się spektroskopią optyczną półprzewodników było naturalną konsekwencją doświadczenia nabytego w zakończonych badaniach w zakresie spektroskopii atomowej. Prof. H. Niewodniczański dostrzegł również przyszłościowe perspektywy badawcze spektroskopii optycznej półprzewodników. Pomimo że do tego czasu w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej były głównie prowadzone badania w zakresie spektroskopii atomowej, prof. H. Niewodniczański zaakceptował podjęcie nowego kierunku badań spektroskopowych i aktywnie wspierał ich rozwój aż do swojej śmierci w grudniu 1968 roku.

Gorąca zachęta do podjęcia tych badań nadeszła również od wysoko cenionych specjalistów w zakresie fizyki półprzewodników profesorów Wiesława Wardzyńskiego z Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego



Rysunek 2. Wspólny spacer po Czantorii w czasie Międzynarodowej Szkoły Fizyki Półprzewodników w Jaszowcu. Prof. W. Wardzyński (drugi z lewej) i prof. W. Gariat w środku grupy uczestników Szkoły.

i Witolda Gariata z Instytutu Fizyki PAN w Warszawie. Prof. W. Gariat, jako wybitny specjalista w zakresie technologii wytwarzania monokryształów związków półprzewodnikowych, zaoferował stałe dostarczanie, niezbędnych do badań, bardzo wysokiej jakości monokrystalicznych materiałów półprzewodnikowych. Dało to podwaliny wieloletniej, wzajemnej bardzo efektywnej współpracy. Wykorzystując wymienione powyżej sprzyjające okoliczności, w roku 1965 w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej IF UJ powstała Pracownia Spektroskopii Optycznej Półprzewodników (PSOP).

Badania eksperymentalne w Pracowni Spektroskopii Optycznej Półprzewodników (PSOP)

Działalność badawczą PSOP zapoczątkowały próby przystosowywania próżniowego spektrografu z pryzmatem i soczewkami z krystalicznego fluorytu, używanego we wcześniejszych badaniach widm liniowych Si IV⁶ do badań współczynników absorpcji i odbicia światła półprzewodników. Spektrograf ten został zakupiony w Niemczech przez profesora H. Niewodniczańskiego w roku 1946 za środki otrzymane od Niemiec w ramach reparacji wojennych wypłacanych za mienie zrabowane w czasie II wojny światowej. Odpowiednie przystosowanie tego spektrografu do badań optycznych półprzewodników napotkało jednakże na szereg poważnych trudności technicznych, które ostatecznie przesądziły o rezygnacji z adaptacji spektrografu fluorytowego do dalszych badań i o konieczności podjęcia starań o zakup odpowiedniego monochromatora na obszar próżniowego nadfioletu. Równocześnie z pracami nad adaptacją spektrografu był budowany jednowiązkowy odbiciomierz fotoelektryczny na obszar widzialny i bliskiego nadfioletu (od 600 do 200 nm) co odpowiada energii promieniowania od ok. 1,8 – 6 eV. Uruchomiony odbiciomierz działał w systemie „wiązki białej”, tzn. że skupiona na próbce „biała” wiązka światła ze źródła po odbiciu od próbki była skupiana na szczeliny wejściowej monochromatora analizującego rozkład widmowy wiązki. Natężenie wiązki było mierzone przez fotonowielacz umieszczony na szczeliny wyjściowej monochromatora i rejestrowane po wzmocnieniu przez fazy czuły elektroniczny układ detekcyjny. Przy użyciu tego układu pomiarowego zostały uzyskane i opublikowane w roku 1969 pierwsze wyniki badań dotyczące analizy widm odbicia światła dla kilku monokrystalicznych potrójnych związków półprzewodnikowych CdHgTe, wytworzonych przez Roberta Gałązkę w laboratorium technologicznym Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego [4, 5]⁷. Przy użyciu tego odbiciomierza fotoelektrycznego kontynuowano również dalsze badania fundamentalnego odbicia światła dla monokrystalicznych roztworów stałych Cd_xHg_{1-x}Te [5, 7] i Zn_xCd_{1-x}Te [6].

Rozwijane w PSOP badania widm odbicia światła półprzewodników stały się motorem do sformułowania w październiku 1969 roku wniosku Instytutu Fizyki UJ o włączenie do Centralnego Planu 5-letniego badań naukowych i rozwoju technicznego na lata 1971 – 1975, badań optycznych ciała stałego w zakresie próżniowego nadfioletu 6 – 10 eV, w oparciu o posiadaną bazę aparaturową oraz budowane konwencjonalne wodorowe i helowe źródła promieniowania elektromagnetycznego świecące w obszarze próżniowego nadfioletu. Aby sprostać tym planom PSOP została wzmocniona, przyjętymi na asystentury do ZFD, mgr Martę Zimnal i mgr Barbarę Pukowską.

Na przełomie roku 1970 i 1971 autor artykułu, jako stypendysta Rządu Republiki Włoch, odbył półroczny staż w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Rzymskiego „La Sapienza” w grupie teoretycznej prof. Franco Bassaniego, wybitnego specjalisty w skali światowej

w zakresie obliczeń teoretycznych struktury elektronowej krystalicznych ciał stałych. W czasie tego pobytu powstała publikacja, przygotowana wspólnie z drugim stypendystą dr Peterem M. Lee z Uniwersytetu w Lancaster (GB). Praca ta dotyczyła teoretycznego opisu istotnej roli poprawek relatywistycznych przy powstawaniu przejścia od prostej do odwróconej przerwy wzbronionej w strukturze elektronowej potrójnych związków Cd_{1-x}Hg_xTe [10]. Ta publikacja i wcześniejsze prace eksperymentalne opisujące strukturę elektronową roztworów stałych Cd_xHg_{1-x}Te [5, 7] i Zn_xCd_{1-x}Te [6] złożyły się na rozprawę habilitacyjną autora artykułu [8, 9]. W trakcie pobytu na stypendium Prof. F. Bassani zaproponował by prowadzone w PSOP ZFD w Krakowie, eksperymentalne badania fundamentalnego odbicia półprzewodników w zakresie energii 1,8 – 6 eV, rozszerzyć na zakres próżniowego nadfioletu



Rysunek 3. Prof. G.F. Bassani, inicjator współpracy włosko-polskiej.

(10 – 200 eV) z użyciem promieniowania synchrotronowego z 1,1 GeV synchrotronu usytuowanego w INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) we Frascati. Badania odbicia światła półprzewodników miały być prowadzone we współpracy z kierowaną przez prof. F. Bassaniego grupą Solidi Roma⁸, posiadającą bezpośredni dostęp do wykorzystujących promieniowanie synchrotronowe dwu optycznych linii pomiarowych we Frascati. Podjęcie wspólnych włosko-polskich eksperymentalnych badań optycznych rozszerzało i nakładało wyższe wymagania merytoryczne na rozpoczęte wcześniej w PSOP badania w zakresie spektroskopii optycznej półprzewodników. Aby sprostać tym wymaganiom w kolejnych latach współpracy doskonalono technikę pomiaru fundamentalnego odbicia światła i szczegółowo analizowano czynniki fizyczne (naprężenia wewnętrzne, wpływ obróbki mechanicznej i trawienia na chropowatość powierzchni) badanych materiałów. Włączenie się do badań z zastosowaniem promieniowania synchrotronowego miało kolosalne znaczenie dla rozwoju, opisaną szczegółowiej w paragrafie 4, aktywności naukowej PSOP.

Po objęciu przez autora artykułu w październiku 1973 roku kierownictwa Zakładu Fizyki Ogólnej (ZFO), PSOP została automatycznie przeniesiona z ZFD do ZFO wraz ze współpracownikami mgr Jolantą Dydecką, mgr Barbarą Pukowską i mgr Martą Zimnal oraz technikiem elektronikiem Romualdem Samsonem.



Rysunek 4. Prof. W. Girit i autor artykułu w przerwie obrad Międzynarodowej Szkoły Fizyki Półprzewodników w Jaszowcu.

Fundamentalne odbicie światła półprzewodników jest niezwykle czułe na jakość badanych monokryształów i stan powierzchni odbijającej, w związku z tym bez dobrych, wszechstronnie atestowanych materiałów półprzewodnikowych dostarczonych przez renomowane pracownie technologiczne nie można było myśleć o wiarygodnych badaniach. Ze względu na bardzo wysokie koszty uruchomienia technologii wytwarzania dobrej jakości atestowanych monokryształów i cienkich warstw materiałów półprzewodnikowych potrzebnych do badań, została nawiązana przez PSOP nieformalna, obopólnie korzystna współpraca z kilkoma krajowymi i zagranicznymi laboratoriami technologicznymi. PSOP współpracowała z laboratoriami technologicznymi Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego (prof. R.R. Gałązka, prof. W. Girit), Instytutu Fizyki PAN w Warszawie (prof. W. Girit i A. Mycielski), Instytutu Tele-Radiotechnicznego w Warszawie (doc. S. Ignatowicz), Instytutu Fizyki Politechniki Wrocławskiej (prof. J. Pawlikowski), Zakładu Fizyki PAN w Zabrzu (doc. L. Żdanowicz) i Instytutu Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie (prof. J. Żmija i M. Demianiuk), a także z dr R.D. Tomlinsonem z Departamentu Inżynierii Elektrycznej i Elektroniki (Department of Electronic and Electrical Engineering) Uniwersytetu w Salford (Wielka Brytania), prof. J.K. Viscacasem z Instytutu Fizyki Uniwersytetu w Wilnie i prof. W.J. Potykieviczem z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Kijowskiego. Przez wiele lat kontynuowano również współpracę z prof. W. Giritem po jego emigracji do Wenezueli, gdzie w Instituto Venezolano de Investigaciones Cientificas, Centro de Fisica (IVIC) w Caracas wytwarzał obok monokryształów związków półprzewodnikowych grupy II-VI z metalami przejściowymi również bardzo wysokiej jakości monokrystaliczne związki typu II III₂ VI₄ (np. CdIn₂S₄, ZnIn₂S₄, ZnGa₂Se₄, CdGa₂S₄) i I III VI₂

(np. CuInS₂) analizowane pod kątem zastosowań fotowoltaicznych.



Rysunek 5. Obrady Międzynarodowej Konferencji Cienkich Warstw w Budapeszcie. W pierwszym rzędzie trzeci od lewej prof. J.K. Viscacas, w drugim rzędzie trzeci od lewej autor artykułu, obok doc. S. Ignatowicza.

Po nawiązaniu współpracy naukowej z kilkoma pracowniami technologicznymi były prowadzone badania fundamentalnego odbicia dla cienkich warstw ZnTe i CdHgTe [14, 17, 21, 22, 25, 26, 43] oraz cienkich warstw Zn₂As₃ [13, 18]. Nowo zaangażowani współpracownicy Marek Podgórný i Andrzej Rodzik prowadzili badania fundamentalnego odbicia światła w funkcji składu i temperatury monokryształów roztworów stałych CdHgTe [19, 20, 23] a Katarzyna Karnicka-Mościcka dla cienkich warstw Cd₃As₂ [27, 37, 64, 65, 72]. Wszystkie te badania były prowadzone przy użyciu odbiciomierza fotoelektrycznego w systemie „wiązki białej”, w którym uciążliwą technicznie obróbkę danych pomiarowych zastąpiono układem automatycznej fazoczułej rejestracji danych [15]. Układ ten znacznie podwyższał dokładność pomiarów i szybkość rejestracji rezultatów doświadczalnych. Realizując cele naukowe PSOP zapowiadane w projekcie współpracy z grupą Solidi Roma, dotyczące prowadzenia komplementarnych badań całego obszaru fundamentalnego odbicia półprzewodników, w roku 1975 został zakupiony przez IF UJ dla PSOP 1-metrowy siatkowy monochromator próżniowy firmy Hilger & Watts E766. Na bazie tego monochromatora został zbudowany i uruchomiony dwuwiązkowy odbiciomierz na zakres próżniowego nadfioletu od 5 – 11 eV z automatyczną rejestracją danych [40]. Z pomocą tego spektrometru przeprowadzono badania wpływu temperatury na współczynniki absorpcji i odbicia dla CdF₂ [47,57] oraz analizę fundamentalnego odbicia dla monokryształów Cd_xHg_{1-x}Te [56,59] i ZnTe [60]. W celu udoskonalenia pomiarów fundamentalnego odbicia półprzewodników w zakresie energii 1,5 – 6 eV zbudowano w PSOP kilka wersji dwuwiązkowego odbiciomierza fotoelektrycznego z automatyczną, fazoczułą rejestracją danych współpracującą on line z komputerem [73, 95].

W skonstruowanych odbiciomierzach wiązka światła monochromatycznego była dzielona na dwie części: jedna z nich oświetlała badaną próbkę i odbita od niej padała na fotopowielacz mierzący jej natężenie, druga

część, jako wiązka odniesienia, za pomocą układu luster była kierowana wprost na drugi fotopowielacz.



Rysunek 6. A. Rodzik przy dwuwieżkowym odbiciomierzu z automatyczną rejestracją danych.

W takim układzie był możliwy pomiar współczynnika odbicia (lub absorpcji), z wyeliminowaniem efektów związanych z „podświetlaniem wiązką białą” badanych materiałów oraz fluktuacji natężenia padającego światła. Budowane zestawy pomiarowe odznaczały się bardzo wysoką czułością i dokładnością pomiaru, przewyższającą czułość i zdolność rozdzielczą spektrometrów komercyjnych produkowanych przez renomowane firmy zagraniczne w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych ubiegłego wieku.

Należy podkreślić, że powszechnie stosowane w spektroskopii optycznej do końca lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku spektrografy z rejestracją widm optycznych na kliszy fotograficznej, w ciągu zaledwie dziesięciu lat, zostały zastąpione w laboratoriach naukowych przez monochromatory z fotoelektryczną rejestracją natężeń widm optycznych (np. przy użyciu fotopowielaczy) i fázoczułych wzmacniaczy współpracujących on line z komputerem. Rozwój techniki pomiarowej w PSOP nadążył za tą rewolucyjną przebudową światowej techniki pomiarowej w spektroskopii optycznej.

W latach 1977 – 1980 zostały podjęte próby zwiększenia dokładności opisu struktury elektronowej badanych materiałów poprzez zastosowanie metod modulacyjnych w badaniach spektroskopowych [35, 52]. Jednakże ze względu na obecność dodatkowych charakterystycznych efektów w odbiciowych widmach modulacyjnych, nie rozwijano dalej tej metodyki i skierowano wszystkie wysiłki na uzyskanie jak najwyższej czułości i zdolności rozdzielczej w bezpośrednim pomiarze odbicia światła.

Ze względu na bardzo silną zależność fundamentalnego odbicia od doskonałości struktury krystalicznej badanych materiałów oraz stopnia czystości i chropowatości powierzchni próbek, prowadzone badania dostarczały nie tylko podstawowe informacje o strukturze elektronowej materiałów, ale również wiedzę o niedoskonałościach i naprężeniach wewnętrznych struktury krystalicznej badanych materiałów a także o właściwościach powierzchni odbijającej.

Tak więc obok podstawowych badań struktury elektronowej pasm walencyjnego i przewodnictwa wielu związków półprzewodnikowych, wymagających eliminacji efektów zaburzających poprawny pomiar [13, 14, 16, 17, 18-23, 27, 30, 31, 37, 47, 56, 57, 59-61, 66, 72-74, 81], siłą rzeczy, rozwinęły się również diagnostyczne badania niedoskonałości struktury krystalicznej [25, 31, 38, 55, 58, 66, 67, 71, 81, 84] i naprężeń wewnętrznych w kryształach i polikrystalicznych cienkich warstwach [25, 45, 55, 58, 61, 62] oraz nierówności powierzchni odbijających [38, 41-46, 49-51, 65].

Badania wpływu nierówności powierzchni na widmo optyczne metali i półprzewodników znalazło zastosowanie jako nieniszcząca metoda diagnostyki powierzchni metalizowanego i niemetalizowanego kwarcu [41-44, 46, 49-51]. Metoda ta była opracowywana, w ramach programów węzłowych i resortowych, dla Instytutu Tele-Radiotechnicznego w Warszawie.

W PSOP przybywało współpracowników. Razem z podstawowym składem osobowym: Ewą Czarnecką-Such, Barbarą Pukowską, Markiem Podgórnym, Andrzejem Rodzikiem, Markiem Turowskim i Martą Zimnal-Starnawską, w rozwoju badań uczestniczyli doktoranci: Barbara Oleś, Katarzyna Karnicka-Mościcka, Marek Czyżyk, Józef Oleszkiewicz, Dorota Dębowska, Jacek Goniakowski, Artur Hołda i Paweł Zajdel oraz spore grono magistrantów. Część doktorantów po uzyskaniu stopnia doktora została zatrudniona na etatach w PSOP ZFO⁹. Prowadzone badania dostarczały szereg nowych i interesujących rezultatów. Szeroko zakrojone badania struktury elektronowej półprzewodnikowych związków mieszanych $Cd_xHg_{1-x}Te$ zostały nagrodzone w roku 1978 zespołową nagrodą Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego i Techniki III stopnia¹⁰.

Marek Turowski po obronie doktorskiej w roku 1982 wyjechał na stypendium do Instytutu Fizyki w Uniwersytecie Nijmegen (Holandia) a następnie do Departamentu Fizyki Uniwersytetu w Wisconsin (USA), gdzie pod kierunkiem prof. Giorgio Margaritondo brał udział w badaniach fotoemisji elektronowej krzemu oraz heterozłączy na orientowanych monokryształach GaAs z użyciem promieniowania synchrotronowego z synchrotronu w Wisconsin [87-93]. Niestety po powrocie do Polski z tego stażu naukowego zrezygnował z pracy w IF UJ i wyjechał na stałe do USA.

W drugiej połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia została zapoczątkowana również współpraca naukowa z Wilnem i Kijowem na bazie zawartych umów o współpracy bezpośredniej pomiędzy Uniwersytetami Jagiellońskim, Wileńskim i Kijowskim. Wizyty prof. J.K. Viscakasa i A. Żyndlusa z Uniwersytetu Wileńskiego oraz prof. W.J. Potykiewicza z Uniwersytetu Kijowskiego zaowocowały wspólnymi publikacjami [31, 60]. Po przerwie natury politycznej, w latach dziewięćdziesiątych ożywiły się kontakty naukowe z Instytutem Fizyki Uniwersytetu Kijowskiego oraz zostały nawiązane kontakty naukowe z prof. V.I. Strikhą i H. Pieką oraz z dr P.W. Żukowskim z Instytutu Fizyki Uniwersytetu w Mińsku. Wynikiem współpracy A. Rodzika i E. Czarneckiej-Such na temat fizyko-

chemicznych własności powierzchni CdMnTe oraz własności dielektrycznych i optycznych Si implantowanego jonami były publikacje [167, 169, 173, 176, 189, 192].



Rysunek 7. Wizyta w Instytucie Radiofizycznym Uniwersytetu Kijowskiego. Od lewej E.V. Buzaneva, A. Rodzik i E. Czarnecka-Such.

Ze względu na wspólne z PSOP zainteresowania badaniami z użyciem promieniowania synchrotronowego w roku 1996 dołączył do ZFO Marek Stankiewicz i utworzył Pracownię Spektroskopii Molekularnej (PSM). Przedmiotem jego badań były procesy i mechanizmy relaksacji prostych drobin tzn. badania fotodysocjacji molekularnej, foto-fragmentacji, fotoemisji elektronowej molekuł i fotojonizacji przy użyciu promieniowania synchrotronowego z synchrotronu SRS w Daresbury (Wielka Brytania) i synchrotronu MAX II (Szwecja). Rezultaty tych badań zostały opublikowane w kilkunastu artykułach [227-230, 232-237, 251, 253-257]. W utworzonej Pracowni Spektroskopii Molekularnej ZFO, M. Stankiewicz obok badań z użyciem promieniowania synchrotronowego wykorzystał do badań fotodysocjacji drobin posiadany przez PSOP ZFO 1-metrowy monochromator próżniowy Hilger&Watts oraz laser Nd/YAG z 2 i 3 harmoniczną. Na bazie tych urządzeń został zbudowany analizator czasu przelotu z detektorem mikrokanalikowym i wielokanałowym przetwornikiem czas/cyfra o wysokiej zdolności rozdzielczej oraz komputerową akwizycją danych doświadczalnych. W budowie aparatury i badaniach uczestniczył doktorant Piotr Winiarczyk oraz magistranci.

Istotnym czynnikiem działalności naukowej PSOP ZFD a następnie PSOP ZFO była współpraca naukowa rozwijana z Włochami, Republiką Federalną Niemiec, Wielką Brytanią, Szwecją i ZSSR. Szczególnie ścisła i długotrwała współpraca PSOP ułożyła się z Instytutem Fizyki, a następnie Departamentem Fizyki Wydziału Inżynierii Uniwersytetu Rzymskiego I „La Sapienza” i z Laboratorium Narodowym we Frascati (Laboratori Nazionali di Frascati (LNF)) przynależącym do Instytutu Narodowego Fizyki Jądrowej (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)). Ponadto przez szereg lat trwała współpraca z Departamentem Fizyki Uniwersytetu w Trento (od 1986 roku, umowa podpisana w roku 1989) oraz z Instytutem Fizyki Uniwersytetu

Rzymskiego II „Tor Vergata” (formalnie potwierdzona umową o współpracy bezpośredniej w roku 1993).

Wczesna działalność naukowa PSOP została zaprezentowana w roku 1983 w artykule opublikowanym w czasopiśmie *Optica Applicata* [83]. Pełna działalność badawcza, wchodzących w skład Zakładu Fizyki Ogólnej, Pracowni Spektroskopii Optycznej Półprzewodników, Pracowni Spektroskopii Interferencyjnej i Pracowni Spektroskopii Molekularnej, została opisana w artykule zamieszczonym w roku 2014 na stronie internetowej IF UJ¹¹.

Powstanie i działalność grupy teoretycznej PSOP

Do właściwej interpretacji eksperymentalnych widm współczynników absorpcji i fundamentalnego odbicia światła niezbędne jest porównywanie ich z bardzo zaawansowanym opisem teoretycznym struktury elektronowej półprzewodników. W związku z tym w PSOP zaistniała potrzeba wykształcenia grupy teoretyków specjalizujących się w obliczeniach teoretycznych dotyczących struktury elektronowej półprzewodników i metali. Korzystając z licznych dyskusji ze współpracującymi z PSOP teoretykami prof. F. Bassanin i jego uczniem F. Casulą, współautorem wspólnej z autorem tego artykułu teoretycznej publikacji na temat struktury elektronowej $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [35], M. Podgórnym a następnie M. Czyżyk rozpoczęli samodzielne teoretyczne obliczenia struktury elektronowej CdTe i HgTe [53] oraz $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [48], a także analizy poprawek w opisie potencjału miseczkowego stosowanego w obliczeniach struktury elektronowej [85]. W zadaniu tworzenia w PSOP wyspecjalizowanej grupy teoretyków szczególnie ważne wsparcie otrzymaliśmy od prof. Joachima Treutscha, kierownika Katedry Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu w Dortmundzie¹². Prof. J. Treusch, wybitny specjalista w badaniach teoretycznych struktury elektronowej ciał stałych, dzięki swym wpływom, ułatwił uzyskanie rocznego stypendium im. Aleksandra von Humboldta dla M. Czyżyka i dwuletniego stypendium dla M. Podgórnego oraz przyjął bezpośrednią opiekę nad obydwoma stypendystami. M. Podgórnym opublikował wspólnie ze współpracownikami prof. M. Treuscha J. Pollmannem [111] i D. Wagnerem [112] bardzo cenne rezultaty naukowe dotyczące obliczeń struktury elektronowej roztworów stałych SiGe oraz strukturalnych i magnetycznych przejść fazowych w stopach metali przejściowych. W wyniku dalszych badań M. Podgórnym opublikował kilka interesujących wyników teoretycznych na temat magnetyzmu wędrownego w ciałach stałych. Publikacje te stanowiły podstawę doskonałej dysertacji habilitacyjnej, wyjaśniającej nierozwiązany od końca dziewiętnastego wieku, problem bardzo niskiej rozszerzalności termicznej inwaru [115, 130-132].

Przyjazna pomoc i zaangażowanie prof. J. Treuscha, przy wykształceniu dla PSOP dojrzałych naukowo młodych teoretyków, owocowała przez wiele lat. Z upływem czasu powstała grupę teoretyczną wzmocnili: J. Goniakowski – doktorant M. Podgórnego, ściśle współpracujący z nami R. Markowski, pracownik Zakładu Techniki Komputerowej, oraz doktoranci PSOP

ZFO J. Oleszkiewicz, A. Hołda i P. Zajdel, którzy opanowali biegle zaawansowane teoretyczne techniki obliczania struktury elektronowej półprzewodników.



Rysunek 8. Spotkanie towarzyskie w domu M. Zimnal-Starnawskiej. Od lewej M. Podgórnym, M. Czyżyk, F. Antonangeli i autor artykułu.

W latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku PSOP poniosła dotkliwe straty szczególnie wśród kolegów teoretyków. M. Podgórnym bezpośrednio po habilitacji, oraz współpracujący z PSOP R. Markowski, zaraz po doktoracie, ulegli fascynacji niezwykłym rozwojem informatyki w USA i wyjechali tam na wieloletnie kontrakty, z których już nie wrócili do Polski. M.T. Czyżyk, z podobnych motywów, pozostał na stałe w Holandii. Poniesiony uszczerbek w gronie teoretyków w PSOP został częściowo uzupełniony przez Jerzego Koniora, wychowanka Zakładu Fizyki Statystycznej IF UJ i adiunkta w Instytucie Fizyki Wyższej Szkoły Pedagogicznej (obecnie Uniwersytetu) w Rzeszowie.

Do roku 1989 głównym przedmiotem badań J. Koniora była mikroskopowa teoria płynów prostych, a badania prowadził we współpracy z prof. Czesławem Jędrzejkiem z IF UJ [134, 148]. Jeszcze przed powrotem do IF UJ w 1989 roku J. Konior rozpoczął badania teoretyczne w zakresie nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego [135, 174, 191, 193, 209]. Badania te kontynuował m.in. podczas pobytu we Francji w Uniwersytecie Paris-Nord [149, 163, 164, 166, 210] oraz we współpracy z doktorantem P. Piekarzem [252, 258].

Za wkład do teorii układów silnie skorelowanych i nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego został nagrodzony Nagrodą Ministra Edukacji Narodowej¹³. Niedługo po zatrudnieniu w PSOP ZFO ukończył rozprawę habilitacyjną [238] i włączył się aktywnie do prowadzonych w PSOP teoretycznych badań struktury elektronowej półprzewodników [211]. Wspólnie z eksperymentatorami interpretował wyniki doświadczalne fundamentalnego odbicia oraz absorpcyjnej spektroskopii rentgenowskiej XANES i EXAFS [201, 214, 225, 264, 268, 269]. Poniesione straty personalne kompensowało również ponowne nawiązanie kilkuletniej współpracy „na odległość” z dr P.M. Lee teoretykiem z Uniwersytetu w Lancaster, dawnym współpracownikiem autora artykułu. Dzięki rozwojowi internetu współpraca ta zaowocowała wieloma wspólnymi wartościowymi publikacjami [128,

129, 159, 141, 142, 155, 157, 158, 177, 198, 239, 240, 243-245].



Rysunek 9. Wspólna herbata w sali seminaryjnej PSOP. Na zdjęciu W. Kwiatek (pierwszy od lewej), J. Oleszkiewicz, autor artykułu, E. Czarnecka-Such, B. Popiołek (sekretarka), P. Klocek (częściowo widoczny), M. Stankiewicz, M. Zimnal-Starnawska, J. Konior i R. Samson i A. Banaś.

Udział PSOP w badaniach z użyciem promieniowania synchrotronowego

Złożona wiosną 1971 roku przez prof. F. Bassaniego autorowi artykułu propozycja podjęcia współpracy polsko-włoskiej w zakresie wykorzystywania do badań w spektroskopii optycznej półprzewodników promieniowania synchrotronowego z 1,1 GeV synchrotronu usytuowanego w Frascati była nadzwyczaj cenna i dalekowzroczna. Proponowane badania rozszerzały horyzonty i istotnie modyfikowały programy badawcze PSOP. Jednakże doprowadzenie do faktycznej współpracy wymagało jeszcze szeregu ustaleń oraz kilku lat zabiegów organizacyjnych.

W czasie kolejnej wizyty autora artykułu w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Rzymskiego w roku 1972 i rewizytach w Krakowie w roku 1973 profesorów F. Bassaniego i G. Chiarottiego oraz dr A. Balzarottiego, został sformułowany na piśmie plan wspólnych badań, dotyczący analizy własności optycznych różnych związków półprzewodnikowych z użyciem promieniowania synchrotronowego.

Plan ten przewidywał następujący podział zadań: ze strony polskiej: a) proponowanie tematyki z zakresu badania struktury elektronowej związków półprzewodnikowych, b) dostarczanie we współpracy z Instytutem Fizyki PAN w Warszawie wysokiej jakości monokrystalicznych związków półprzewodnikowych, c) prowadzenie komplementarnych badań współczynników odbicia i pochłaniania światła w zakresie energii promieniowania od 1,5 do 10,0 eV¹⁴, oraz d) częściowe wsparcie teoretycznymi obliczeniami struktury elektronowej związków półprzewodnikowych;

ze strony włoskiej: a) współpracę w ramach grupy Solidi Roma przez udostępnienie polskim współpracownikom czasu pracy na próżniowym spektrometrze wykorzystującym jako źródło światła promieniowanie synchrotronu elektronowego we Frascati w zakresie energii światła od 10 do 300 eV oraz b) współpracę w zakresie obliczeń teoretycznych struktury elektronowej związków półprzewodnikowych.

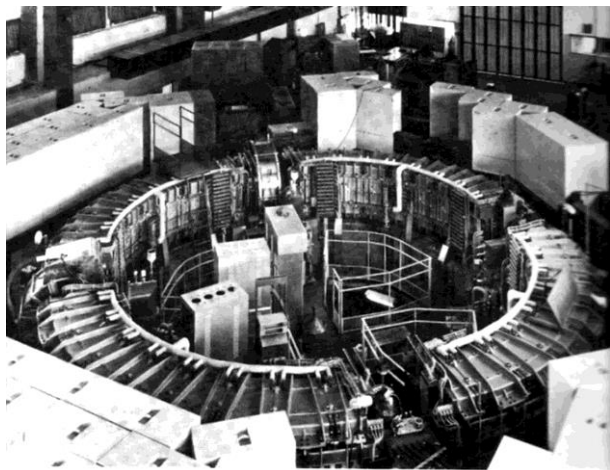
Opracowany przez PSOP ZFO i grupę Solidi Roma szczegółowy program badań w zakresie spektroskopii optycznej ciała stałego z wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego był pierwszą tego typu inicjatywą w Polsce.

Ścisłe kontakty badawcze PSOP z grupą Solidi Roma nabrały tempa na przełomie roku 1974 i 1975, gdy na zaproszenie LNF we Frascati i CNR (Centro Nazionale delle Ricerche) autor artykułu, jako visiting profesor, wziął udział w badaniach mechanizmu anomalnie wysokiej absorpcji atomowego wodoru w palladzie. Badania spektroskopowe własności układu Pd/H w dalekim próżniowym nadfiolecie miały rozstrzygnąć o mechanizmie tego anomального pochłaniania.

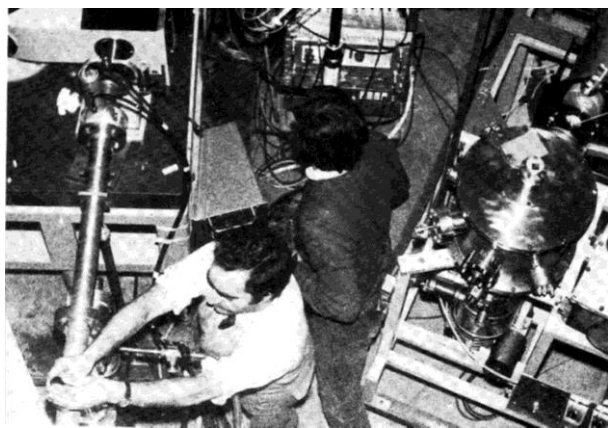
Niestety, w trakcie badań 1,1 GeV synchrotron uległ nieodwracalnemu uszkodzeniu i został zdemontowany. Częstkowe rezultaty badań przerwanych awarią synchrotronu zostały zebrane i opublikowane wspólnie z członkami grupy Solidi Roma w roku 1977 [24,28,29]. W roku 1975 jeszcze przed likwidacją 1,1 GeV synchrotronu elektronowego we Frascati, grupa Solidi Roma rozpoczęła, intensywne prace nad wykorzystaniem promieniowania synchrotronowego z 1,5 GeV elektronowego pierścienia akumulującego ADONE, usytuowanego w Narodowym Laboratorium we Frascati (LNF).

Przystąpiono wówczas do budowy laboratorium synchrotronowego oraz do projektowania i konstrukcji kilku nowych linii pomiarowych wykorzystujących ADONE jako źródło światła.

Działania te koordynował prof. F. Bassani w ramach powstałego wówczas programu użytkowania promieniowania synchrotronowego PULS (Programma per l'Utilizzazione della Luce di Sincrotrone). W realizację programu włączyła się również poszerzona grupa Solidi Roma. Do współpracy programowej zaproszono także współpracowników z PSOP. Dyrekcja Instytutu Fizyki i administracja centralna UJ intensywnie wspierała wszelkie zabiegi umożliwiające rozwój współpracy PSOP ZFO z grupą Solidi Roma.



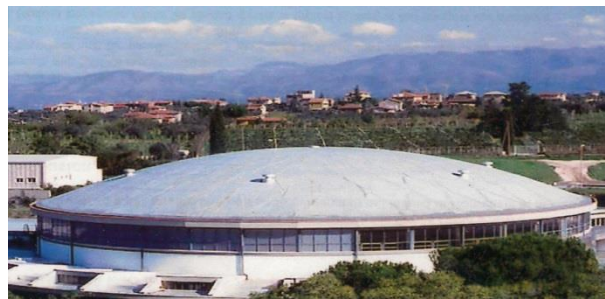
Rysunek 10. Pierścień 1.1 GeV synchrotronu elektronowego we Frascati.



Rysunek 11. Optyczne linie pomiarowe przy 1,1 GeV synchrotronie: monochromator Mc Pherson na zakres 100 – 500 eV (po lewej) i monochromator Hilger & Watts na zakres 10 – 50 eV. Prof. E. Burattini ustawia monochromator Mc Phersona.

Starania te, opisane szczegółowiej w *Kalendarium aktywności Instytutu Fizyki I władz Uniwersytetu Jagiellońskiego w staraniach o dostęp i o wykorzystywanie źródeł promieniowania synchrotronowego w pracach badawczych*¹⁵, doprowadziły do zawarcia w roku 1979 umowy o współpracy bezpośredniej normującej realną, wieloletnią, obustronną współpracę pomiędzy Instytutami Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego i Uniwersytetu Rzymskiego I „La Sapienza”.

Szczegółne zasługi w tych staraniach mieli prof. F. Bassani, kierujący grupą Solidi Roma i równocześnie dyrektor Programu PULS oraz profesorowie G. Chiarotti i A. Balzarotti. F. Bassani w czasie wizyty w Instytucie Fizyki UJ w grudniu 1975 roku, na spotkaniu z Rektorem UJ prof. M. Karasim zaproponował oficjalną współpracę PSOP ZFO z programem PULS we Frascati. Chęć podjęcia współpracy została oficjalnie potwierdzona przez Rektora UJ kilka dni po wyjeździe prof. F. Bassaniego, stosownym listem intencyjnym do prezydenta INFN.



Rysunek 12. Kopuła budynku pierścienia akumulacyjnego ADONE w Narodowym Laboratorium we Frascati.

W oparciu o te uzgodnienia, z początkiem roku 1976 profesorowie F. Bassanii i G. Chiarotti wystąpili równocześnie, przez CNR do Polskiej Akademii Nauk i przez Ministerstwo Szkolnictwa Wyższego Republiki Włoskiej do Polskiego Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki, o zawarcie porozumień o współpracy Instytutu Fizyki UJ z programem PULS w zakresie badań naukowych z użyciem promieniowania do Polskiej

Akademii Nauk i przez Ministerstwo Szkolnictwa Wyższego Republiki Włoskiej do Polskiego Ministerstwa Szkolnictwa Wyższego i Nauki, o zawarcie porozumień o współpracy Instytutu Fizyki UJ z programem PULS w zakresie badań naukowych z użyciem promieniowania synchrotronowego.



Rysunek. 13. Pierścień akumulujący ADONE.

Podstawą porozumień o współpracy był program badań przygotowany w PSOP ZFO w roku 1973. Przy dużej przychylności władz rektorskich obydwu uniwersytetów, a w szczególności Prorektora UJ Prof. Alojzego Gołębiowskiego, przez dwa lata poprzedzające podpisanie umowy o współpracy bezpośredniej pomiędzy Uniwersytetem Rzymskim La Sapienza i Uniwersytetem Jagiellońskim trwała regularna wymiana współpracowników polskich i włoskich. Wymiana ta zapoczątkowała blisko trzydziestoletnią ścisłą współpracę IF UJ w programach zastosowania promieniowania synchrotronowego w fizycznych i chemicznych badaniach naukowych.

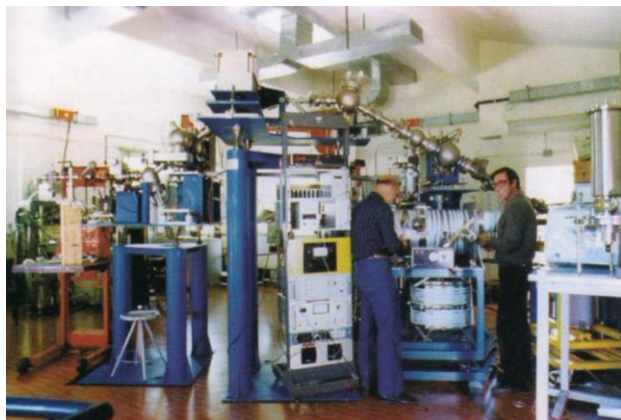


Rysunek 14. Prof. M. Piacentini (od prawej) A. Balzarotti w gabinecie autora artykułu.

W październiku 1979 r. została podpisana w Krakowie przez Rektorów Mieczysława Hessa i Antonio Ruberti'ego formalna umowa o współpracy bezpośredniej pomiędzy uniwersytetami, która przewidywała wspólne badania Instytutów Fizyki obydwu uczelni dotyczące fizyki ciała stałego, w zakresie użytkowania promieniowania synchrotronowego w ramach programu PULS. Odpowiedzialnymi za poprawną realizację dołączonego

w aneksie programu badań zostali Prof. F. Bassani oraz autor artykułu. Umowa ta, zawarta w celu realizacji bardzo specjalistycznie potraktowanych zadań badawczych w fizyce ciała stałego, została w latach następnych rozszerzona na współpracę bezpośrednią obydwu uniwersytetów w kilku innych dziedzinach naukowych. Po zawarciu umowy o współpracy bezpośredniej pomiędzy Uniwersytetami Jagiellońskim i Rzymskim w roku 1979, otworzyły się przed PSOP zupełnie nowe możliwości eksperymentalne. W ramach programu PULS - ADONE była na ukończeniu budowa czterech linii eksperymentalnych w tym dwu linii absorpcyjnej spektroskopii rentgenowskiej (XAS) tzn. linii na zakres energii 2 – 6 keV – zwana linią PULS i linii rentgenowskiej PWA (Progetto Wiggler Adone) na twardsze promieniowanie rentgenowskie w zakresie energii 4,5 – do 25 keV, linii spektroskopii optycznej w próżniowym nadfiolecie od 6 do 30 eV oraz linii spektroskopii fotoelektronowej (PES). Jako pierwsza, została uruchomiona w roku 1979 linia PULS a następnie linia PWA. Obydwie linie miały służyć do badań lokalnej struktury kryształów metodą EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure) i do analizy struktury przykrawędziowej krawędzi rentgenowskich XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure), umożliwiającej badanie struktury elektronowej pasma przewodnictwa ciał stałych. Również na linii pomiarowej do badań optycznych w próżniowym nadfiolecie trwały ostatnie prace nad jej uruchomieniem. W tej tak bardzo korzystnej sytuacji, została podjęta decyzja o wykorzystaniu do badań materiałów półprzewodnikowych najpierw dwu wyżej wymienionych linii rentgenowskich a następnie linii optycznej na zakres próżniowego nadfioletu. Zgłoszony przez nas projekt dotyczący analizy struktury krystalicznej w półprzewodnikowych związkach potrójnych $Cd_{1-x}Mn_xTe$ dla różnej zawartości Mn z zastosowaniem metody EXAFS został zaakceptowany i wszedł do realizacji w roku 1980. Podjęty program badawczy był nowy i bardzo atrakcyjny naukowo również ze względu na oczekiwaną możliwość łączenia w związkach $CdMnTe$ własności materiałów półprzewodnikowych i magnetycznych. Stwarzało to zapowiedź bardzo obiecujących aplikacji tego typu związków, nazywanych półprzewodnikami półmagnetycznymi lub bardziej poprawnie półprzewodnikami z rozcieńczonym magnetyzmem. Materiały te były badane dotychczas w PSOP metodą fundamentalnego odbicia w zakresie energii promieniowania widzialnego i bliskiego nadfioletu. Instytut Fizyki PAN w Warszawie wytwarzał wysokiej jakości monokryształy tych związków oraz prowadził bardzo szeroki front badań własności strukturalnych, elektrycznych i magnetycznych. Nasza propozycja przeprowadzenia komplementarnych badań opisanego lokalnej struktury krystalicznej przy użyciu analizy EXAFS, dostępnej tylko z zastosowaniem promieniowania synchrotronowego oraz własności optycznych w szerokim zakresie energii światła służących poznaniu struktury elektronowej, została przyjęta z zadowoleniem zarówno w Instytucie Fizyki PAN jak i w programie PULS. Eksperymentalna analiza EXAFS wykonana przez grupę włosko-polską¹⁶ na

próbkach $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$, została zaprezentowana w trakcie International Conference on EXAFS and Near Edge Structure we Frascati we wrześniu 1982, a następnie w październiku tego roku, jako komunikat na Zjeździe Włoskiego Towarzystwa Fizycznego w Perugii [64].

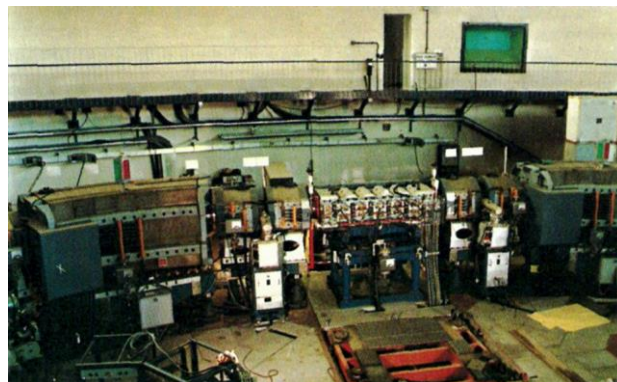


Rysunek 15. Autor artykułu (tyłem) i dr A. Savoya przy optycznej linii pomiarowej PULS w ADONE (1980)

Pewnej dozy adrenaliny dostarczyła świadomość, że na konferencji we Frascati amerykańskie J.C. Mikkelsen i J.B. Boyce zaprezentowali bardzo podobne wyniki doświadczalne dla potrójnych związków półprzewodnikowych $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$. W obydwu przypadkach brak było odpowiedniej interpretacji odkrytych, ale niezupełnie zrozumiałych cech badanych materiałów. Aby możliwie szybko znaleźć właściwe wyjaśnienie przeprowadzonego eksperymentu zespół polsko-włoski został wzmocniony przez M. Podgórnego i M. Czyżyka, kończących właśnie staże teoretyczne w Dortmundzie. Ich pomysłowość i przygotowanie teoretyczne spowodowały przełom w interpretacji wyników doświadczalnych. Grupa amerykańska opublikowała wyniki badań w the Physical Review w roku 1983, jednakże z interpretacją budzącą poważne wątpliwości¹⁷. Nasze wyniki doświadczalne opublikowaliśmy w tym samym czasopiśmie, kilka miesięcy później, z poprawnym modelowym opisem lokalnej struktury krystalicznej sfalerytu [77, 78, 100]. Wprowadzony przez nas model, później nazwany w literaturze modelem sztywnych kationów, wszedł na trwałe do analizy struktury lokalnej związków potrójnych o strukturze sfalerytu. Wspólnie z grupą włoską przeprowadziliśmy badania jeszcze dla kilku innych związków potrójnych stosując z powodzeniem ten model w interpretacji wyników [64, 70, 77-80, 96-102, 104-107]. Wyniki te zostały zauważone nie tylko w światowej literaturze specjalistycznej. Polscy członkowie zespołu zostali wyróżnieni Zespołową Nagrodą Ministra II stopnia (1986)¹⁸ a ponadto autor artykułu otrzymał w roku 1989 Nagrodę Sekretarza Naukowego PAN¹⁹.

Uruchomienie linii rentgenowskiej spektroskopii absorpcyjnej PWA na zakres energii 4 – 25 keV znacznie poszerzyło zakres badań struktury lokalnej w związkach półprzewodnikowych. Analiza XANES i spektroskopia emisji fotoelektronowej (PES) mogą być metodami komplementarnymi do analizy fundamentalnego odbicia ciał stałych. Fundamentalne odbicie światła dostarcza

głównie informacji o splocie gęstości stanów pasm walencyjnego i przewodnictwa (funkcja łącznej gęstości stanów). Natomiast spektroskopia emisji fotoelektronowej i analiza XANES dostarczają informacji odpowiednio o gęstości stanów pasma walencyjnego i pasma przewodnictwa. Mając możliwości badania fundamentalnego odbicia światła i równocześnie szeroki dostęp do analizy XANES można było znacznie wzbogacić wiedzę o strukturze elektronowej badanych półprzewodników.



Rysunek 16. Magnes Wigglera na rentgenowskiej linii PWA w ADONE

W roku 1983 PSOP uzyskała dostęp do synchrotronowej optycznej linii pomiarowej w zakresie próżniowego nadfioletu (6 – 25 eV). Na tej linii zostały przeprowadzone badania przejść rdzeniowych ze stanów d w fundamentalnym odbiciu monokrystalicznych związków ZnTe , CdTe i HgTe , opublikowane w roku 1986 [108, 110]. Badania te zapoczątkowały wieloletnią owocną polsko-włoską współpracę w zakresie spektroskopii optycznej półprzewodników, w której widmo fundamentalnego odbicia półprzewodników i metali było mierzone w Krakowie w zakresie 1,5 – 6 eV, a w zakresie od 6 – 30 eV na linii optycznej z użyciem promieniowania synchrotronowego z pierścienia kumulującego ADONE we Frascati [122, 124, 170, 175, 179, 182, 185, 187, 188, 190, 196, 199, 203, 205, 206, 221, 241]. Teoretyczną interpretację wyników doświadczalnych opracowywali koledzy z grupy teoretycznej PSOP.

Współpraca pomiędzy PSOP i programami PULS oraz PWA trwały nieprzerwanie aż do roku 1994, gdy zakończył pracę pierścień kumulujący ADONE. Zebrana, w ostatnich miesiącach przed zakończeniem pracy ADONE, bardzo duża liczba wyników doświadczalnych dotyczących widm współczynnika odbicia światła w zakresie energii od 6 – 25 eV oraz krawędzi rentgenowskich (analiza XANES) dla szeregu monokryształów związków potrójnych, siarczków i selenków cynku z wszystkimi metalami przejściowymi, przygotowanych i dostarczonych głównie przez W. Giriata, były opracowywane przez nas jeszcze przez kilka lat po zamknięciu i demontażu ADONE. Po zakończeniu pracy ADONE współpraca ZFO (Zakład Fizyki Ogólnej) z wyżej wymienionymi uniwersytetami włoskimi weszła w nową fazę. Upřednio zawarte umowy o współpracy bezpośredniej zostały wykorzystane do wspólnych badań, w zakresie

modulacyjnej analizy fotoakustycznej [220, 242] i emisji fotoelektronowej dla binarnych i potrójnych związków półprzewodnikowych z żelazem [202, 207, 216]. Badania emisji fotoelektronowej zostały wykonane we współpracy trójspronnej z Wincosin Synchrotron Radiation Centre (USA). W tym okresie były również kontynuowane badania rentgenowskie metodą XANES korzystając z pierścienia kumulującego BESSY I w Berlinie [208, 222] i nowo powstałego pierścienia kumulującego ELETTRA w Triście.

Bilansem doskonale układającej się przez wiele lat współpracy PSOP z grupą Solidi Roma oraz z programami PULS i PWA były znaczące wyniki badawcze w zakresie opisanej powyżej rentgenowskiej analizy EXAFS i XANES, a także liczne rezultaty eksperymentalne w zakresie spektroskopii optycznej od bliskiej podczerwieni do zakresu dalekiego próżniowego nadfioletu. Wyniki te poparte naszymi zaawansowanymi obliczeniami teoretycznymi dostarczyły ważnych informacji o strukturze elektronowej pasma walencyjnego i przewodnictwa wielu badanych podwójnych i potrójnych związków półprzewodnikowych oraz związków potrójnych z metalami przejściowymi. Bezpośrednim rezultatem współpracy było ponad 80 publikacji w czasopismach o cyrkulacji międzynarodowej i czynny udział w wielu konferencjach międzynarodowych.

Od roku 1995 w hali po zdemontowanym pierścieniu kumulującym ADONE powstawał w LNF nowy zderzacz (colider) elektronowo-pozytronowy DAΦNE o energii elektronów i pozytronów 0,7 GeV i unikalnie silnym prądzie elektronów i pozytronów (do ok. 2 A) poruszających się w pierścieniu przeciwbieżnie. Wyprowadzane z tego pierścienia promieniowanie synchrotronowe ma kilkakrotnie wyższe natężenie w porównaniu z innymi pierścieniami kumulującymi. Charakterystyka spektralna promieniowania synchrotronowego z DAΦNE, umożliwiła budowę linii pomiarowej do badań absorpcyjnej i emisyjnej spektroskopii rentgenowskiej w zakresie energii od 1,5 - 4 keV oraz linię spektroskopii optycznej w zakresie dalekiej podczerwieni począwszy od energii kilkudziesięciu cm^{-1} (FIR). W tym obszarze widmowym są obserwowane wzbudzenia fononowe charakterystyczne dla krystalicznej struktury lokalnej ciał stałych. Z tego względu wyniki analizy wzbudzeń fononowych mogły być konfrontowane z wynikami badań struktury lokalnej kryształów otrzymanymi przy użyciu analizy EXAFS. Prowadzona przez PSOP we współpracy z dr V Robouchem z LNF we Frascati pogłębiona analiza wyników EXAFS wykazała preferencje obsadzeń jonów w potrójnych i poczwórnych roztworach związków półprzewodnikowych [225, 238, 246, 250, 261, 268, 269]. W celu potwierdzenia komplementarności badań struktury lokalnej kryształów przy użyciu analizy EXAFS z badaniami częstości wzbudzeń fononowych kryształów w obszarze dalekiej podczerwieni, PSOP nawiązał współpracę z grupą prof. Eugeniusza Szeregija z Instytutu Fizyki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Rzeszowie (obecnie Uniwersytet Rzeszowski). Nawiązana współpraca umożliwiła rozszerzenie badań prowadzonych przez grupę prof.

E. Szeregija przy użyciu konwencjonalnych źródeł światła o badania przeprowadzone we Frascati z użyciem promieniowania synchrotronowego z DAΦNE. Wykorzystanie linii pomiarowej FIR z DAΦNE było możliwe dzięki posiadanym przez PSOP ważnym umowom o współpracy bezpośredniej z Uniwersytetami Rzymskimi La Sapienza i Tor Vergata oraz posiadanemu przez LNF porozumieniu z Unią Europejską o współpracy naukowej. Uzyskane pełne wyniki eksperymentalne częstości i natężeń wzbudzeń fononowych dały możliwość przeprowadzenia badań preferencji obsadzeń jonów w potrójnych i poczwórnych roztworów stałych związków półprzewodnikowych grupy II – VI. Oczekiwane preferencje obsadzeń jonów zostały potwierdzone w odpowiednich natężeniach drgań fononowych badanych związków półprzewodnikowych [260, 265, 266].

Warto na końcu tego rozdziału ocenić efektywność współpracy polsko-włoskiej pomiędzy Instytutem Fizyki UJ i Instytutami Fizyki Uniwersytetów w Rzymie i w Trento oraz grupą Solidi Roma i programem PULS na tle stanu badań naukowych prowadzonych z użyciem promieniowania synchrotronowego przez Polaków afiliowanych w Polsce. Ta ocena została oparta na spisie publikacji i dysertacji wykonanych przy użyciu promieniowania synchrotronowego przez polskich autorów afiliowanych w polskich instytucjach naukowych, zamieszczonym w internecie przez Polskie Towarzystwo Promieniowania Synchrotronowego (PTPS)²⁰. Spis ten informuje, że najwcześniejsze publikacje z udziałem Polaków pochodziły z roku 1977. Dotyczyły one przygotowywania w Narodowym Instytucie Fizyki Jądrowej (INFN) we Frascati cienkich warstw Pt nasycanych wodorem, przeznaczonych do badań optycznych w próżniowym nadfiolecie z użyciem promieniowania synchrotronowego z 1,1 GeV synchrotronu [24, 28, 29]. Publikacje te były rezultatem, omawianej powyżej, współpracy Instytutów Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego i Uniwersytetu Rzymskiego I „La Sapienza”, zapoczątkowanej przez te instytucje w pierwszej połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Według spisu PTPS w dziesięcioleciu 1977 – 86 ukazały się 34 publikacje z udziałem polskich autorów afiliowanych w Polsce. Autorzy reprezentowali: Instytuty Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Politechniki Warszawskiej i Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz Instytut Fizyki PAN w Warszawie i Instytut Fizyki Jądrowej w Krakowie. Wśród tych publikacji aż 21 artykułów było wynikiem współpracy IF UJ z Uniwersytetem Rzymskim I i grupą Solidi Roma. Stanowiło to 68% całej aktywności Polaków w dziesięcioleciu 1977 – 1986. W następnym pięcioleciu (1987 – 1991) aktywność naukowa polskich użytkowników promieniowania synchrotronowego znacznie wzrosła. Podjęli współpracę kolejni badacze i instytuty naukowe. W tym okresie opublikowano 85 artykułów, z czego blisko 25% (22 publikacje) było wynikiem współpracy polsko-włoskiej pomiędzy IF Uniwersytetu Jagiellońskiego a IF Uniwersytetu Rzymskiego i IF Uniwersytetu w Trento oraz programem PULS. Przytoczone zestawienie aktywności naukowej PSOP IF UJ w porównaniu z piętnastoletnim

ogólnopolskim użytkowaniem promieniowania synchrotronowego w badaniach naukowych, uzmysławia celowość organizowanej konsekwentnie przez Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego, od pierwszej połowy lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia, ścisłej współpracy polsko-włoskiej ukierunkowanej na stosowanie promieniowania synchrotronowego w fizyce ciała stałego.

Współpraca PSOP z Polskim Towarzystwem Promieniowania Synchrotronowego

Wraz z coraz bardziej intensywnym rozwojem badań z użyciem promieniowania synchrotronowego w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia, fizycy i chemicy oraz współpracujący z nimi lekarze i biologowie zaczęli wyrażać potrzebę integracji polskiego środowiska naukowego, pracującego przy różnych źródłach promieniowania synchrotronowego. Wychodząc naprzeciw temu zapotrzebowaniu PSOP ZFO prowadząca intensywne badania z użyciem promieniowania synchrotronowego w zakresie absorpcyjnej spektroskopii rentgenowskiej i spektroskopii optycznej półprzewodników, podjęła się wspólnie z Instytutem Fizyki PAN w Warszawie organizacji pierwszego Sympozjum Użytkowników Promieniowania Synchrotronowego.

W lutym 1991 roku z inicjatywy i staraniem profesora Juliana Auleytnera oraz autora artykułu, odbyło się w Uniwersytecie Jagiellońskim, w pałacyku Szyszko-Bohusza I Krajowe Sympozjum Użytkowników Promieniowania Synchrotronowego. Na Sympozjum wygłoszono 25 piętnastominutowych komunikatów z badań prowadzonych przez polskich badaczy przy użyciu promieniowania synchrotronowego. Uczestnicy Sympozjum zadeklarowali chęć utworzenia Polskiego Towarzystwa Promieniowania Synchrotronowego (PTPS). Wśród 28 członków założycieli było dwunastu z Instytutu Fizyki i Chemii UJ, w tym osiem osób z PSOP ZFO. Pozostali reprezentowali Instytut Fizyki PAN w Warszawie, Uniwersytet Warszawski i kilka innych ośrodków. W maju 1991 r. Towarzystwo zostało zarejestrowane z siedzibą w Instytucie Fizyki UJ i rozpoczęło działalność integracyjną i edukacyjną powstającego środowiska naukowego poprzez organizację międzynarodowych szkół i sympozjów. PSOP ZFO włączyło się bardzo aktywnie do działalności w PTPS organizując Drugie Krajowe Sympozjum Użytkowników Promieniowania Synchrotronowego w Mogilanach (1993) i Czwarte Krajowe Sympozjum w Domu Polonijnym Uniwersytetu Jagiellońskiego w Przegorzałach (1997) oraz uczestniczyło czynnie we wszystkich inicjatywach PTPS. Szczegóły tej działalności zostały przedstawione w Kalendarium starań Instytutu Fizyki (notka 14) oraz Kalendarium starań Polskiego Towarzystwa Promieniowania Synchrotronowego o dostęp do europejskich źródeł promieniowania synchrotronowego²¹. Zapraszanie wielu wybitnych specjalistów z ośrodków synchrotronowych na organizowane przez PTPS i odbywające się regularnie międzynarodowe sympozja i szkoły ułatwiało nawiązywanie kontaktów i tworzenie owocnej współpracy przez polskich uczestników

międzynarodowych szkół i sympozjów oraz sympozjów krajowych.



Rysunek 17. Uczestnicy 1-szej Międzynarodowej Szkoły i Sympozjum Promieniowania Synchrotronowego Naukach Przyrodniczych (1992). W pierwszym rzędzie stoją profesorowie B. Orłowski, I. Sosnowska, autor artykułu, J. Auleitner, G. Margaritondo, M. Antonetti oraz K. Jabłońska. W dalszych rzędach m. in. W. Wierzchowski, J. Haertwig, E. Sobczak, W. Kwiątek, R. Haensel, J. Nordgren, C. Malgrange, A. Kvik

Uwagi końcowe

Po przejściu autora artykułu na emeryturę w roku 2002, Zakład Fizyki Ogólnej i Pracownie należące do Zakładu zostały rozwiązane. Personel Zakładu został włączony do Zakładu Fizyki Doświadczalnej, z którego ZFO wyodrębnił się w roku 1970. W trzydziesto-dwuletniej działalności naukowej ZFO były prowadzone intensywne badania naukowe w nietatwej eksperymentalnie spektroskopii interferencyjnej, spektroskopii optycznej półprzewodników, absorpcyjnej spektroskopii rentgenowskiej, spektroskopii fotoemisji elektronowej, spektroskopii fononowej i spektroskopii molekularnej. Uzyskane wyniki badań były zauważane przez specjalistów. Opublikowano około 270 artykułów i komunikatów w większości w czasopismach o cyrkulacji międzynarodowej. W ZFO doktoryzowało się 15 asystentów i doktorantów²² a 4 osoby habilitowały się²³. Szereg prac doktorskich zostało nagrodzonych Nagrodami Indywidualnymi III stopnia Ministra Nauki, Szkolnictwa Wyższego i Techniki. W chwili rozwiązania ZFO liczył 9 pracowników: dwu doktorów habilitowanych J. Koniora i M. Stankiewicza, czterech starszych wykładowców: R. Kloch, B. Pukowską, J. Szczeklika i M. Zimnal-Starnawską, dwu samodzielnych fizyków: E. Czarnecką-Such i J. Olejniczaka oraz starszego elektronika R. Samsona. Doktorzy habilitowani J. Konior i M. Stankiewicz otrzymali tytuły profesora w roku 2009. Prof. J. Konior należy obecnie do Zakładu Nanostruktur i Nanotechnologii, a prof. M. Stankiewicz jest dyrektorem Narodowego Centrum Promieniowania Synchrotronowego Solaris, w którym od wiosny bieżącego roku trwa rozruch pierwszego polskiego synchrotronu SOLARIS. Będzie on służyć jako źródło promieniowania synchrotronowego przeznaczone do badań w naukach przyrodniczych. Zbudowane źródło promieniowania synchrotronowego jest wielką szansą

i jednocześnie wyzwaniem dla przyszłych użytkowników promieniowania synchrotronowego w Polsce.

Po rozwiązaniu ZFO niektórzy pracownicy przeniesieni do ZFD kontynuowali działalność naukową rozwijaną w PSOP. J. Konior prowadził badania teoretyczne analizy XANES dla struktury elektronowej siarki w siarczach metali przejściowych i w komórkach rakowych prostaty [270, 271, 274-276] a B. Pukowska analizowała metodami spektroskopii optycznej dyfuzję defektów w związkach CdHgTe i wpływ oczyszczania CdTe wodorem na jego fundamentalne odbicie światła [272, 273]. M. Zimnal-Starnawska w roku 2008 uczestniczyła w serii badań XANES na linii rentgenowskiej zderzacza elektronowo pozytonowego DAΦNE w Frascati.

Podziękowanie

Autor bardzo dziękuje dawnym współpracownikom dr Marcie Zimnal-Starnawskiej i dr Barbarze Pukowskiej, za wiele cennych uwag i uzupełnień wykorzystanych przy pisaniu tego artykułu.

- ¹ A. Strzałkowski, B. Średniawa, *Historia Fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim*, w książce Uniwersytet Jagielloński, Złota Księga Wydziału Matematyki i Fizyki, red. B. Szafirski, Kraków 2000.
- ² A. Kisiel, H. Niewodniczański, A. *High Luminosity Quartz Spectrograph for the Far Ultra Violet Region 2300-1850 Å*, Acta Phys. Polon. **17**, (1958) 361; A. Kisiel, H. Niewodniczański, *Intensity Ratios in Doublets of the Fine Structure in the Al III Spectra*, Acta Phys. Polon. **20** (1961) 633; A. Kisiel, *Intensity Ratios in Doublets of the Fine Structure in the Al III and Si IV Spectra*, Acta Phys. Polon **23** (1963) 167.
- ³ J.C. Phillips, *Direct observation of open magnetic orbits*, J. Electronics, **1**, 162 (1955); F.C. Jahoda, *Fundamental Absorption of Barium Oxide from its Reflectivity Spectrum*, Phys. Rev., **107** (1958) 1261.
- ⁴ H.R. Philipp, A.E. Taft, *Optical Constants of Germanium in the Region 1 to 10 eV*, Phys. Rev., **113** (1959) 1493.
- ⁵ H.R. Philipp, A.E. Taft, *Optical Constants of Silicon in the Region 1 to 10 eV*, Phys. Rev., **120** (1960) 37.
- ⁶ A. Kisiel, *Intensity Ratios in Doublets of the Fine Structure in the Al III and Si IV Spectra*, Acta Phys. Polon., **23** (1963) 167.
- ⁷ Spis publikacji Pracowni Spektroskopii Optycznej Półprzewodników cytowanych w artykule w nawiasach kwadratowych można znaleźć w internecie pod adresem http://www.synchrotron.org.pl/publ/biulet/vol14/Kisiel_spis_publicacji_PSOP.pdf
- ⁸ W skład grupy Solidi Roma wchodził ze strony Instytutu Fizyki Uniwersytetu Rzymskiego „La Sapienza”: F. Bassani, A. Bianconi, G. Chiarotti, i M. Piacentini, a ze strony Naczelnego Instytutu Zdrowia (Istituto Superiore di Sanita) E. Burattini, i G. Grandolfo
- ⁹ M. Czyżyk, D. Dębowska i J. Oleszkiewicz
- ¹⁰ Nagrodę otrzymali A. Kisiel i A. Rodzik
- ¹¹ A. Kisiel, B. Pukowska, M. Zimnal-Starnawska, *Działalność Naukowa Zakładu Fizyki Ogólnej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego (1970-2002)*, (2014)

- <http://www.fais.uj.edu.pl/nauka/o-profesorach-teksty-wywiady>,
- ¹² Prof. J. Treutsch po objęciu stanowiska dyrektora Forschungszentrum w Julich został uhonorowany tytułem doktora honoris causa Uniwersytetu Jagiellońskiego za wybitny wkład w teoretyczną fizykę ciała stałego i organizowanie bardzo efektywnej międzynarodowej współpracy naukowej a w szczególności wspieranie aktywne rozwoju wspólnych badań w fizyce jądrowej Forschungszentrum i Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego.
 - ¹³ Wspólnie z A.M. Olesiem i J. Dutką
 - ¹⁴ Badania w nadfiolecie próżniowym 6 - 10 eV miały być zrealizowane w Krakowie po zakupie przez IF UJ 1-metrowego próżniowego monochromatora siatkowego firmy Hilger & Watts i po zbudowaniu odbiciomierza fotoelektrycznego z odpowiednimi wodorowymi i helowymi źródłami światła.
 - ¹⁵ A. Kisiel, *Kalendarium aktywności Instytutu Fizyki I władz Uniwersytetu Jagiellońskiego w staraniach o dostęp i o wykorzystywanie źródeł promieniowania synchrotronowego w pracach badawczych*, Synchrotron Radiation in Natural Science, Bulletin of the Polish Synchrotron Radiation Society, Vol. **12**, No. 1-2, 56 – 62 (2013), oraz A. Kisiel, *Kalendarium starań Instytutu Fizyki i władz Uniwersytetu Jagiellońskiego o dostęp i o wykorzystywanie europejskich źródeł promieniowania synchrotronowego w pracach badawczych*, <http://www.if.uj.edu.pl/documents/3830070/70875255/Kalendarium%20IF%20UJ.pdf> (2015)
 - ¹⁶ W składzie: F. Antonangeli, A. Balzarotti, N. Motta, M. Piacentini, A. Kisiel, M. Zimnal-Starnawska, A. Mycielski i W. Giriat
 - ¹⁷ J.C. Mikkelsen, J. B. Boyce, Phys. Rev., **B28** (1983) 7130.
 - ¹⁸ Nagrodzeni zostali M. Czyżyk, A. Kisiel, M. Podgórný i M. Zimnal-Starnawska
 - ¹⁹ Nagroda za kierowanie zespołem i udział w pracy pt. „Badanie struktury lokalnej i własności termodynamicznych roztworów stałych typu $A_{1-x}B_xC$ o uporządkowaniu tetraedrycznym”
 - ²⁰ *Publications and dissertations concerning the synchrotron radiation and its applications, as well as closely related fields by authors affiliated in Poland, Table IV, Sorted according to publication year – strona internetowa* - <http://cluster003.ovh.net/~synchrot/old/July2008-Year-v2.pdf>
 - ²¹ A. Kisiel, *Kalendarium starań Polskiego Towarzystwa Promieniowania Synchrotronowego w latach 1991 – 2002 o dostęp do europejskich źródeł promieniowania synchrotronowego*, Synchrotron Radiation in Natural Science, Bulletin of the Polish Synchrotron Radiation Society, Vol. **12**, No. 1-2, 63 - 66 (2013)
 - ²² Marek Podgórný (1978), Barbara Oleś (1979), Barbara Pukowska (1979), Marta Zimnal-Starnawska (1980), Katarzyna Karnicka-Mościcka (1981), Andrzej Rodzik (1981), Marek Turowski (1982), Józef Oleszkiewicz (1985), Dorota Dębowska (1992), Jacek Goniakowski (1995), Artur Hołda (1998), Paweł Zajdel (2003), Agnieszka Banaś (2004)
 - ²³ Marek Podgórný (1991), Jerzy Konior (1998), Marek Stankiewicz (1998).