

Prof. dr hab. Yuriy Zorenko  
Katedra Materiałów Optoelektronicznych  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy  
ul. Powstańców Wielkopolskich, 2  
85-090 Bydgoszcz

### Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr Zuzanny Mianowskiej** pt. **„Badanie energetycznej zdolności rozdzielczej i nieproporcjonalnej odpowiedzi świetlnej scyntylatora CsJ:TI w oparciu na spektrometrię cyfrową”**.

#### Uwagi wstępne

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pani mgr Zuzanny Mianowskiej pt. „Badanie energetycznej zdolności rozdzielczej i nieproporcjonalnej odpowiedzi świetlnej scyntylatora CsJ:TI w oparciu na spektrometrię cyfrową” została wykonana w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku pod kierunkiem prof. dr hab. Marka Moszyńskiego, a promotorem pomocniczym tej pracy była dr Agnieszka Syntfield-Kaźych.

Praca doktorska mgr Zuzanny Mianowskiej została wykonana w ramach krajowych projektów NCBiR ININDEX i Ram-Scan oraz międzynarodowych projektów C-BORD oraz ReVaMP w programie H2020. Autorka pracy w roku 2020 realizowała również projekt z funduszy NCBJ dla naukowców na wczesnym etapie kariery zawodowej o tematyce spójnej z tematem pracy doktorskiej.

#### Aktualność pracy

Temat pracy doktorskiej Pani mgr Zuzanny Mianowskiej dotyczy scyntylatorów - materiałów które efektywnie pochłaniają i przetwarzają promieniowanie jonizujące w kwanty światła w zakresie widzialnym lub UV, rejestrowane są za pomocą detektorów półprzewodnikowych. Prezentowane w pracy doktorskiej badania dotyczą zagadnienia poprawy parametrów spektrometrycznych rejestracji kwantów gamma z zastosowaniem różnych procedur analizy impulsów świetlnych scyntylacji bardzo dobrze znanego materiału scyntylacyjnego z grupy halogenków alkalicznych – domieszkowanego talem jodku cezu CsI:TI. Wcześniejsze badania nad odpowiedzią świetlną kryształów CsI:TI i innych materiałów scyntylacyjnych, wykazały, że na parametry spektrometryczne tych kryształów duży wpływ ma istnienie długożyciowych składowych scyntylacji. Poprawę tych parametrów można uzyskać poprzez wydłużenie czasu kształtowania impulsów świetlnych w procesie detekcji światła co jest ważnym zagadnieniem przy opracowaniu detektorów na bazie konwencjonalnych materiałów scyntylacyjnych.

W pracy doktorskiej Pani mgr Zuzanny Mianowskiej badania nad poprawą właściwości scyntylacyjnych detektorów na bazie kryształów CsJ:TI przeprowadzono z użyciem trzech różnych metod pomiaru oraz odpowiedniej analizy danych. W szczególności, zostały przeanalizowane i omówione parametry ilości światła, energetycznej zdolności rozdzielczej (w tym rozdzielczości wewnętrznej, statystycznej i szumowej) oraz nieproporcjonalności w funkcji czasu trwania impulsu świetlnego.

#### Struktura pracy

Praca doktorska składa się z wprowadzenia, siedmiu rozdziałów tematycznych, podsumowania oraz spisu cytowanej literatury. W części wstępnej Autorka przedstawia aktualną wiedzę dotyczącą fizyki materiałów scyntylacyjnych, spektrometrii promieniowania gamma oraz układów detekcji. W części 2 zatytułowanej „Zjawisko scyntylacji na przykładzie kryształu CsI:TI” Doktorantka analizuje przebieg scyntylacji w poszczególnych stadiach konwersji, transportu oraz luminescencji. W części 3 pt. „Właściwości spektrometryczne detektorów promieniowania gamma” Autorka podaje definicje parametrów pomiarowych,

używanych w spektrometrii gamma. W części 4 zatytułowanej „*Dotychczasowa wiedza o CsI:TI*” Doktorantka podsumuje informacje o roli scyntyлятора CsI:TI w spektrometrii gamma w odniesieniu do innych komercyjnie dostępnych scyntylatorów. W części 5 „*Fotopowielacz, jako przykład detektora światła*” opisano prace konwencjonalnego fotopowielacza jako detektora światła do pomiarów właściwości spektrometrycznych kryształów CsI:TI. W rozdziale 6 „*Metodyka Badań*” opisano techniki pomiarowe służące do rejestracji wydajności scyntylicyjnej kryształów CsJ:TI, w szczególności rozważane są w pracy różnorodne układy pomiarowe.

Główna część dorobku naukowego pracy doktorskiej zawarta jest w Rozdziale 7. *Wyniki*, który podzielono na trzy podrozdziały, dotyczące zastosowanych układów pomiarowych. Końcowa część pracy *Dyskusja wyników* jest zbiorem oryginalnych wyników badań oraz ich analizą. W tej części pracy Doktorantka wymienia także tematykę przyszłych badań jako kontynuację dotychczasowych osiągnięć. Właśnie ten rozdział zawiera główny dorobek naukowy i oryginalne wyniki pracy. Z tego powodu przeanalizuję szczegółowo te dwa aspekty recenzowanej pracy.

### **Naukowy dorobek**

Celem rozprawy doktorskiej było badanie energetycznej zdolności rozdzielczej i nieproporcjonalności scyntylatorów CsI:TI w szerokim zakresie czasu całkowania impulsów scyntylicyjnych. W pracy wykazano, że czas całkowania jest kluczowym parametrem przy testowaniu właściwości scyntylicyjnych materiałów z długożyciowymi zanikami scyntylicyj, co jest charakterystyczne dla kryształów CsI:TI.

W szczególności, w pracy wykazano że przy użyciu konwencjonalnych analogowych układów pomiarowych wydłużenie czasu kształtowania sygnału świetlnego prowadzi do poprawy parametrów spektrometrycznych kryształów CsI:TI. Początkową poprawę energetycznej zdolności rozdzielczej można powiązać z analizą całkowitego impulsu świetlnego kryształów CsI:TI, który opisuje się trzema eksponentyjnymi składowymi z czasem całkowania aż do 35  $\mu$ s.

Jednak istniejące ograniczenia w testowaniu metodami analogowymi materiałów scyntylicyjnych o długich czasach zaniku scyntylicyj (w tym i kryształów CsI:TI), polegają na ustaleniu optymalnego czasu kształtowania impulsów świetlnych, co robi się praktycznie w sposób raczej „z doświadczenia”. Ten problem dotyczy zarówno pomiarów wydajności scyntylicyjnej, energetycznej zdolności rozdzielczej, jak również rejestracji impulsów świetlnych.

W pracy pokazano poprawę nieproporcjonalnej odpowiedzi kryształu CsI:TI ze wzrostem czasu całkowania nawet do 500  $\mu$ s, co z kolei sugerowało także możliwość poprawy energetycznej zdolności rozdzielczej przy długim czasie zbierania światła z scyntyлятора. Jednak w trybie pomiaru pojedynczych impulsów scyntylicyj w zakresie czasu całkowania do 150  $\mu$ s dokładne oszacowanie energetycznej rozdzielczej dla szerokiego zakresu energii kwantów gamma podaje przeciwny wynik. M. in., dla czasu całkowania 30  $\mu$ s, następuje już znaczące pogorszenie rozdzielczości pomimo poprawy nieproporcjonalności.

Wspomniane ograniczenia aparaturowe przyczyniły się do poszukiwań w pracy nowych narzędzi i metod, umożliwiających badanie kryształów CsI:TI w obszarze dłuższych czasów trwania impulsów scyntylicyjnych. Takie rozwiązania niewątpliwie dają układy cyfrowe, w tym także zastosowanie zawansowanych oscyloskopów cyfrowych. W pracy pokazano również, że poprawa nieproporcjonalności przy rejestracji niskoenergetycznych kwantów X i gama może być efektem związanym z dodawaniem się wkładu szumowego w obszarze składowej długożyciowego „ogona” scyntylicyjnego. M in., pokazano, że amplituda sygnału przy rejestracji kwantów X jest porównywalna z poziomem szumu generowanego przez elektronikę oscyloskopu. Informacja taka jest szczególnie istotna w pomiarach nieproporcjonalności scyntylatorów.

### **Najważniejsze osiągnięcia pracy**

Najważniejsze osiągnięcia pracy doktorskiej Pani mgr Zuzanny Mianowskiej dotyczą sposobów polepszenia rejestracji promieniowania X i gamma za pomocą scyntylatorów z długożyciowymi zanikami scyntylicyj, a mianowicie:

1. Opracowanie metodyki pomiarów spektrometrycznych w oparciu o rejestrację i analizę pojedynczych impulsów świetlnych scyntylatorów na przykładzie kryształów CsJ:TI.

2. Zastosowanie zmiennych warunków eksperymentalnych, w tym szerokiego zakresu czasów całkowania, różnych temperatur oraz energii promieni X i gamma w pomiarach liczby fotoelektronów, nieproporcjonalności, energetycznej zdolności rozdzielczej oraz wprowadzenie korekt wpływu szumów elektronicznych oscyloskopu.

3. Wykorzystanie do analizy możliwości poprawy właściwości scyntylicyjnych krysztalów CsJ:TI różnorodnych układów pomiarowych.

### **Nowatorstwo pracy**

Wyniki uzyskane w pracy doktorskiej Pani mgr Zuzanny Mianowskiej stanowią korzystny zestaw nowych danych doświadczalnych i obliczeniowych. W pracy zaproponowano nowe podejście do rejestracji i analizy sygnałów pojedynczych impulsów scyntylicyjacji z fotodetektora w sposób w pełni cyfrowy oraz zaproponowano uzależnienie czasu całkowania sygnału scyntylicyjacyjnego od amplitudy i zaniku scyntylicyjacji.

Autorka po raz pierwszy przeprowadziła pomiary właściwości scyntylicyjnych krysztalów CsJ:TI z zastosowaniem różnych metod pomiarowych, a mianowicie: 1) układy bazującego na analogowej analizie impulsów scyntylicyjnych na bazie modułów elektronicznych w standardzie NIM oraz analogowego wielokanałowego analizatora; 2) układu analogowo–cyfrowego, w którym wybór zdarzeń odbywał się z zastosowaniem modułów NIM, a sama rejestracja uśrednionych sygnałów scyntylicyjnych z obszarów pików pełnej energii prowadzona na oscyloskopie cyfrowym; 3) układu, bazujący na oscyloskopie cyfrowym wysokiej klasy oraz analizie zebranych sygnałów w trybie off-line. Pozwoliło to uzyskać wyniki jakościowo i ilościowo spójne, co jest bardzo ważnym z punktu widzenia ich zastosowania przy rejestracji promieniowania X i gamma za pomocą innych typów scyntylicyjatorów.

Autorka również po raz pierwszy wskazała na potencjalne źródła błędów wynikających z efektu istnienia poziomu szumu generowanego przez elektronikę pomiarową przy rejestracji niskoenergetycznych kwantów X oraz gamma.

### **Prezentacja dorobku naukowego**

Główne wyniki pracy doktorskiej Pani mgr Zuzanny Mianowskiej zostały opublikowane w dwóch pracach w czasopiśmie Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. (w skrocie NIM). To znane czasopismo we wspólnocie badaczy zjawisk scyntylicyjacji, chociaż z nie najwyższej półki (IF tylko 1.335). W wymienionych publikacjach Autorka była pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym. Doktorantka współuczestniczyła również w innych badaniach właściwości scyntylicyjnych krysztala CsI:TI, które zostały opublikowane w czasopiśmie NIM oraz w J. Appl. Phys. (IF= 2.710) we współpracy z grupą uczonych z Instytutu Materiałów Scyntylicyjnych w Charkowie oraz grupą świętej pamięci profesora Richarda Williamsa z Wake Forest University. *Jednak w pracy doktorskiej wyraźnie nie wskazano na indywidualny wkład Autorki w powstaniu tych wspólnych prac.* Ponadto autorka twierdzi, że wyniki uzyskane w pracy doktorskiej zostały wykorzystane w przeglądowej publikacji, wysłanej do znanego czasopisma Journal of Materials Chemistry C. *Jednak ta praca do dzisiaj nie została przyjęta do druku chociażby w wersji elektronicznej, i dla tego przeczytanie rękopisu tej pracy nie było dla Recenzenta możliwe.*

Wyniki pracy doktorskiej zaprezentowano na 4 międzynarodowych konferencjach naukowych oraz jednej szkole doktorskiej, w formie 3 plakatów oraz 3 wystąpień ustnych.

Cały dorobek naukowy Pani mgr Zuzanny Mianowskiej można uważać, jak na prace doktorską, za wystarczający. Obecnie dorobek naukowy doktorantki wg. bazy Scopus to indeks Hirsha – 3; ilość cytowań 13 prac wynosi 31, w tym bez autocytań 14. Uzyskany wynik potwierdza, że autorka recenzowanej pracy doktorskiej jest dojrzałym pracownikiem naukowym, mogącym rozwiązywać postawione Jej zagadnienia we współpracy międzynarodowej.

### **Słabe strony pracy**

Znanym jest fakt że w krysztalach CsI:TI głównym źródłem długoczasowych składowych zaników scyntylicyjacji są pułapki elektronowe, tworzone przez defekty sieci krystalicznej (luki halogenu), które są odpowiedzialne także za pogorszenie rozdzielczości energetycznej. Jednak w recenzowanej pracy pominięto porównania efektów wpływu zmiany koncentracji takich pułapek na możliwości poprawy właściwości scyntylicyjnych krysztalów

CsJ:TI w porównaniu z efektami, otrzymanymi przy użyciu zaproponowanych metod rejestracji scyntytacji. W związku z tym łatwiej byłoby poszukać innych obiektów modelowych do realizacji zagadnień pracy spośród nowoczesnych scyntytlatorów, w których wpływ takich defektów (pułapek) na kinetykę scyntytacji byłby minimalny (BGO, GAGG:Ce, YAP:Ce, LYSO:Ce, etc.). Zwiększyłyby to wagę i uniwersalność merytoryczną pracy oraz możliwości poszerzenia uzyskanych wyników na inne typy scyntytlatorów.

W tekście pracy Autorka prowadzi odpowiednie tłumaczenie przyjętej w środowisku scyntytlacyjnym anglojęzycznej terminologii na język polski. W większości przypadków sukcesywnie udaje się to osiągnąć. Jednak tłumaczenie pewnych terminów jest nadal dyskusyjne. Mianowicie, zamiast zdania „*wolne* zaniki” łatwiej użyć termin „długożyciowe składniki scyntytacji (luminescencji)”. To samo z terminem „poświata” przy tłumaczeniu terminu „glow curve” z języka angielskiego. Tutaj najlepszym odpowiednikiem może być „krzywa jarzenia”; lub nawet lepiej używać termin „fosforescencja” w sensie przebiegu odpowiednich zjawisk fizycznych.

Całkiem zgadzam się ze stwierdzeniem Autorki, że analiza możliwości polepszenia wydajności scyntytlacyjnej oraz energetycznej zdolności rozdzielczej scyntytlatorów z zastosowaniem wyłącznie układów do spektrometrii gamma wydaje się niewystarczająca. W tym temacie należałoby podjąć wysiłki przeprowadzenia takich badań dotyczących rejestracji cząstek alfa i beta ze względu na różne efekty oddziaływania cząstek i kwantów z materiałem scyntytlatora. Pozwoliłoby to poszerzyć wiedzę o powstania zjawiska nieproporcjonalności, co jest bardzo ważnym zagadnieniem w fizyce materiałów scyntytlacyjnych.

Powyższe uwagi oraz te dotyczące publikacji nie mają istotnego wpływu na pozytywną ocenę przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej.

#### **Wnioski końcowe**

Biorąc pod uwagę przedstawioną wyżej moją ocenę pracy, jak również dorobek naukowy doktorantki, a także aprobatę tego dorobku w postaci publikacji i prezentacji na konferencjach międzynarodowych, **stwierdzam, że praca doktorska Pani mgr Zuzanny Mianowskiej spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej** zawarte w „Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, w „Prawie o szkolnictwie wyższym” z dnia 27 lipca 2005 roku oraz w „Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu” z dnia 15 stycznia 2004 roku, **Autorka tej pracy zasługuje na nadania jej stopnia doktora w zakresie fizyki.**

**Wnioskuje o dopuszczenie Panią mgr Zuzannę Mianowską do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**