

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Przemysława Włodarczyka
pod tytułem:
„Podzespoły elektroniczne i optoelektroniczne w magnetometrii atomowej”**

Opiniowana praca doktorska Pana mgr inż. Przemysława Włodarczyka, **„Podzespoły elektroniczne i optoelektroniczne w magnetometrii atomowej”**, powstała w Katedrze Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji, pod promotorską opieką Profesora Marcina Lipińskiego z promotorską pomocą dr Szymona Pustelnego z Instytutu Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Tandem promotorów z dwóch różnych uczelni to rzadkość w naszej tradycji akademickiej, ale na przykładzie tej pracy doktorskiej, bardzo efektywny i udany. Praca ma charakter interdyscyplinarny, formalnie dotyczy dyscypliny elektronika, ale leży między elektroniką i fizyką, a tak naprawdę dotyczy fotoniki, która niestety, jeszcze nie znalazła sobie miejsca w skostniałych definicjach dyscyplin naukowych. Tematyka ma bardzo konkretną motywację i naukową i praktyczną. To świetny przykład interdyscyplinarnej symbiozy naukowej między fizyką i elektroniką, zmotywowany ambitnym programem naukowym.

Rozprawa liczy 104 strony w czterech rozdziałach, zawiera 54 odnośniki literaturowe, w których Doktorant powołuje się na Swoje dwie publikacje z IF oraz jeden patent, które są wynikiem prac w ramach doktoratu.

O pracy doktorskiej

We „**Wstępie**”, Autor przedstawia genezę dysertacji oraz formułuje jej cel i tezy. Cel ma konkretny aplikacyjny charakter i była nim **budowa oryginalnego układu atomowego magnetometru bazującego na oddziaływaniu ośrodka magnetoptycznego ze specjalnie uformowaną koherentną falą spolaryzowaną liniowo z rotującą harmonicznie polaryzacją liniową.**

Doktorant stawia trzy tezy:

- **Magnetometry atomowe mogą być modelowane jako elektroniczne układy zastępcze.**
- **Modulatory jednowstęgowe umożliwiają konstrukcję nowego typu magnetometru atomowego.**
- **Zastosowanie wzorca czasu opartego na systemie GPS pozwala na pomiary synchroniczne sygnałów magnetometrów atomowych w globalnych badaniach podstawowych w zakresie fizyki.**

Rozdział 1, „Model zastępczy magnetometru typu AMOR”, to kompetentne wprowadzenie w fizyczne podstawy działania magnetometru atomowego wykorzystującego zjawisko rotacji Faraday’a, z podstawowym medium jakim są pary atomowe izotopu rubidu ^{87}Rb penetrowane tak zwaną pompującą wiązką laserową o długości fali 795nm, odpowiadającą przejściu $F=2 \rightarrow F'=1$

linii absorpcyjnej D1. Autor w sposób rzeczowy i prosty wytłumaczył istotę tworzenia anizotropii magnetoptycznej w ośrodku poddanym kolinearnemu oddziaływaniu pola magnetycznego i liniowo spolaryzowanej fali elektromagnetycznej. Magnetometria atomowa polega na precyzyjnym pomiarze częstości Larmora, czyli prędkości kątowej spinów atomów ulegających precesji w polu magnetycznym. Autor dokonuje przeglądu trybów pracy i podstawowych konfiguracji magnetometru AMOR (*Amplitude-modulated nonlinear Magneto-Optical Rotation*). Rozróżnia dwa tryby pracy – pasywny (poszukiwania rezonansu przestrajając częstotliwość modulacji promieniowania) i samooscylacyjny (samooscylacje na częstotliwości rezonansowej przy zapewnieniu stosownego sprzężenia zwrotnego w magnetometrze) i cztery podstawowe konfiguracje magnetometrów - jednowiązkowe i dwuwiązkowe ze zrównoważonymi i skrzyżowanymi polaryzatorami. Dla każdej konfiguracji Autor przedstawił pełny opis charakterystyk sygnałów detekowanych w procesie pomiaru. Układy magnetometrów, które są układami hybrydowymi optyczno-elektronicznymi. Fakt, że pomiar pola magnetycznego polega na znajdowaniu częstotliwości rezonansowej Larmora, Autor wprowadza analogie opto-elektryczne, modelując układy optyczne stosownymi obwodami równoważnymi. Jest to oryginalny innowacyjny sposób „opisu elektrycznego” całego układu magnetometru, który Autor skutecznie wprowadza na potrzeby modelowania (używając programu LTspice IV) charakterystyk widmowych sygnału detekowanego w funkcji częstotliwości modulacji laserowej wiązki pompującej. Ten wątek dysertacji jest wprowadzony trochę na potrzeby efektownego wprowadzenia tezy o modelowaniu magnetometru. Zabrakło mi na przykład odpowiedzi i eksperymentalnego dowodu, że kształt detekowanej w eksperymencie krzywej rezonansowej ma kształt lorentzowski, taki jak krzywa rezonansu R,L,C. To oczywiście nie jest zarzut istotny, ale typowe czepianie się recenzenta, który stara się wykazać swoją kompetencję.

Rozdział 2, „Magnetometr typu AMOR”, poświęcony jest opisowi budowy magnetometru typu AMOR. Układ ten stanowił bazę eksperymentalną do pomiarów w trybach pasywnym i samooscylacyjnym. Jest to układ dwuwiązkowy ze zrównoważonym polarymetrem detekującym. Ośrodkiem magnetoptycznym są pary rubidu ^{87}Rb w specjalnej komórce podgrzewanej w jednorodnym wzdłużnym polu magnetycznym. Całość ekranowana specjalnym ekranem magnetycznym. Magnetometr naświetlony jest dwiema wiązkami laserowymi 795nm, jedną ciągłą polaryzującą i drugą modulowaną modulatorem akustooptycznym. Zastosowano jednoczęstotliwościowe lasery półprzewodnikowe DFB, których częstotliwości mogą być precyzyjnie kontrolowane, a w eksperymentach ich widmo było manualnie kontrolowane przy użyciu zewnętrznych komórek rubidowych. Podrozdział 2.6 został poświęcony modulatorowi akustooptycznemu, przy czym Autor omówił tak zwaną konfigurację Ramana-Natha, gdy praktycznie używał konfiguracji Bragga. Opisano układ detekcji ze zbalansowanymi fotodiodami PIN i specjalnie skonstruowanym elektronicznym układem różnicowym minimalizującym poziom szumów. Istotę stanowią pomiary referencyjne. Dokonując klasycznej detekcji synchronicznej przestrajanej w okolicach rezonansu Larmora częstotliwości modulacji wiązki laserowej daje dwie charakterystyczne krzywe: synfazową i kwadraturową. Szerokość tego rezonansu jest miarą czułości pomiaru indukcji pola magnetycznego. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły oszacować optymalne moce wiązek laserowych pompującej i próbującej (około 20 μW) dające czułości pomiaru indukcji magnetycznej $\Delta B = 1.7 \text{ pT/Hz}^{1/2}$. Magnetometr ten pracuje również w reżymie samooscylacji.

Rozdział 3, „Magnetometr z rotującą polaryzacją”, to najważniejsza część dysertacji. W magnetometrach atomowych dwuwiązkowych, każda z wiązek, pompująca i próbująca, mają liniowe polaryzacje. Jak zauważył Doktorant przypadkiem idealnym byłby układ oświetlenia ośrodka wiązką o polaryzacji liniowej, ale z rotującą płaszczyzną polaryzacji o podwojonej częstości Larmora. I to było główne nowatorskie zadanie naukowe i technologiczne. Sama

koncepcja rozwiązania tego problemu jest stosunkowo prosta i polega na złożeniu dwóch liniowo spolaryzowanych, o wzajemnie prostopadłych polaryzacjach, wiązek laserowych, różniących się częstością $2\Omega_L$. Rozwiązanie sygnałowe tego problemu polegało na zaprojektowaniu specjalnego modulatora jednowstęgowego w układzie Hartley'a. Realizacja optyczna bazowała na zastosowaniu dwóch braggowskich komórek akustooptycznych odpowiednio sterowanych. Koncepcję zrealizowano bardzo precyzyjnie kolimując wiązki z obu laserów i justując ich relacje polaryzacyjne. Elementarne pomiary sygnałów w fazie i kwadraturze, pozwoliły wyznaczyć czułość pomiaru indukcji magnetycznej $\Delta B = 0.9 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ i znacząco poprawić czułość metody w porównaniu do magnetometru AMOR. Na podkreślenie również zasługuje demonstracja tego magnetometru w reżymie samooscylacji.

Rozdział 4, „Zastosowanie magnetometrii optycznej w badaniach podstawowych”, to obszerny opis potencjalnych zastosowań magnetometrów w bardzo atrakcyjnym w globalnym programie badawczym tworzenia oryginalnej sieci GNOME (*Global Network of Optical Magnetometers for Exotic Physics*), realizowany przez pięć ośrodków, do detekcji potencjalnych tak zwanych zjawisk egzotycznych. Celem są pomiary magnetometryczne różnych globalnych zjawisk mogących powodować zmiany spinu atomowego, wobec czego pomiary są potrzebne w różnych miejscach globu ziemskiego. Przy synchronizacji zmian spinu atomowego w pięciu ośrodkach badawczych i stosownym ich skorelowaniu, oczekuje się notowania nowych zjawisk, zwanych egzotycznymi. Bez względu na źródło tych zjawisk, warto mierzyć efekty w kilku miejscach i sprawdzać ich korelację. Stąd koncepcja takiej sieci, synchronizującej rejestrowane globalnie wyniki pomiarów magnetometrycznych GNOME, podobnie jak dzieje się to z eksperymentami detekcji fal grawitacyjnych w projekcie LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*). Doktorant opracował i zbudował prototyp układu akwizycji danych synchronizowanych z czasem GPS, który stał się podstawą sieci GNOME. Dokonał przeglądu stosowanych metod synchronizacji pomiarów, przedstawił ogólny schemat blokowy skonstruowanego układu akwizycji dla czterech identycznych torów analogowych. Przedstawił istotę algorytmów synchronizacji zegara i dokonał testów synchronizacji z sygnałem czasu nadawanym przez amerykański instytut standardów NIST. Opracowanie, budowa i przetestowanie prototypu rejestratora synchronizacji magnetometrów świadczy o bardzo dobrej wiedzy teoretycznej i praktycznej Doktoranta w zakresie koncepcji i realizacji zaawansowanych elektronicznych układów analogowo-cyfrowych. Rejestratory opracowane przez Pana Włodarczyka pracują już u czterech członków sieci GNOME, na uniwersytetach: UJ w Krakowie, we Fryburgu, w Berkeley i Harvard University. To znakomite towarzystwo.

Rozdział , „Podsumowanie”, przedstawia skondensowane podsumowanie pracy i osiągnięć Autora, które w pełni podzielam.

Rozprawa doktorska Pana Przemysława Włodarczyka ma charakter eksperymentalno-konstrukcyjny, wsparty warsztatem teoretycznym niezbędnym do interpretacji wyników i zakończyła się konkretnym wynikiem praktycznym – budową i pomiarami oryginalnego nowego magnetometru atomowego, który jest testowany w kilku ośrodkach światowych. Doktorant opracował koncepcję i zrealizował istotną część rejestratora akwizycji sygnałów.

Pan Przemysław Włodarczyk bardzo dobrze opanował warsztat doświadczalny badań i wiedzę w zakresie optycznej magnetometrii atomowej. Wykazał dużą determinację, w celu zakończenia doktoratu konkretnym urzędzeniem.

Cel pracy został osiągnięty. Autor zbudował oryginalny układ magnetometru i przetestował go pozytywnie. Ponadto opracował układ akwizycji danych, pozwalający na budowę sieci GNOME.

Wszystkie trzy tezy pracy:

- że magnetometry atomowe mogą być modelowane jako elektroniczne układy zastępcze,

- że modulatory jednowstęgowe umożliwiają konstrukcję nowego typu magnetometru atomowego,
- że zastosowanie wzorca czasu opartego na systemie GPS pozwala na pomiary synchroniczne sygnałów magnetometrów atomowych w globalnych badaniach podstawowych w zakresie fizyki, **uznając za udowodnione.**

Analiza źródeł literaturowych jest kompetentna i pełna. Praca napisana jest zrozumiale i bardzo dobrze pod kątem edytorskim. Czytając dysertację, dopatrzyłem się kilku literówek, które zignorowałem.

Rozróżniając jakość kategorii rozpraw doktorskich na:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b/ wymagającą wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c/ spełniająca wymagania,
- d/ zasługującą na wyróżnienie,

zaliczam tę rozprawę, jako „zasługująca na wyróżnienie”, motywując to kompletnością rozwiązane problemu zawierającego zagadnienia z frontu współczesnej fizyki i praktycznej elektroniki analogowo-cyfrowej, kompetentnego projektowania i realizacji interesującego eksperymentu z perspektywą dalszych niezwykle atrakcyjnych badań w dziedzinie, jak również z perspektywą naukowego rozwoju Doktoranta.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Przemysława Włodarczyka w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz jej wyróżnienie.