

Warszawa, dnia 02.08.2016 r.

prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk  
Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Instytut Systemów Elektronicznych

***KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY WYDZIAŁU Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji  
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE***

**Tytuł rozprawy: Podzespoły elektroniczne i optoelektroniczne w magnetometrii atomowej**

**Autor rozprawy: mgr inż. Przemysław Włodarczyk**

Podstawą recenzji jest uchwała Rady Wydziału Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH oraz pismo Pani Dziekan w tej sprawie, nr. WIET/575/2016 z dnia 07.07.2016 r.

Autor rozprawy, Pan mgr inż. Przemysław Włodarczyk, doktorant w Katedrze Elektroniki AGH, posiada zapis bibliograficzny w podstawowych naukowych bazach danych o zasięgu globalnym jak Web of Science Thomson Reuters oraz Scopus Elsevier. Parametry zapisów są następujące: dla WoS - liczba dokumentów – 3, liczba cytowań – 9, indeks Hirscha H=1; dla Scopus – liczba dokumentów 4, liczba cytowań 10, indeks Hirscha 2. Wszystkie cytowane prace mają charakter współautorski. Najbardziej aktualne cytowania pochodzą z roku 2015. Są to, subiektywnie według recenzenta – w przypadku nie istnienia w zakresie nauk technicznych krajowych standardów w tym względzie, parametry wystarczające do ubiegania się o stopień naukowy doktora. Doktorant posiada zapis w bazie danych BPP AGH, gdzie wykazano jego 4 publikacje jako współautora.

**1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

**Usytuowanie pracy doktorskiej w obszarze badawczym magnetometrii optycznej i atomowej**

Ultradźwiękowa magnetometria, konkurencyjna wobec magnetometrii nadprzewodzącej, jest aktualną dziedziną zarówno badawczą naukowo-techniczną, jak i aplikacyjną – szczególnie po ostatnich znakomitych postępach w zakresie czułości pomiarowej metodą pompa – wielokrotna próbka i zastosowaniu komórek wieloprzejściowych. Bez dostępu do praktycznych metod ultradźwiękowej magnetometrii, utracone byłyby wartościowe i unikalne narzędzia badania aktywności mózgu, złożonych badań aktywności biologicznej organelli wewnątrzkomórkowych, komórek, białek, niektórych pomiarów subatomowych, nowych pomiarów polowych, i wiele innych. Pod atrybutami praktyczności rozumiemy: kompaktowych, niekriogenicznych, nie wymagających ekranowania, a mimo to bardzo czułych. Magnetometry atomowe detekują jak wewnętrzne poziomy energetyczne w atomie są rozszczepione na różne stany spinowe, poprzez zjawisko Zeemana i precesję Larmora, indukowane przez zewnętrzne pole magnetyczne. W typowym, podstawowym rozwiązaniu sensora, tzw. skalarnym, pompujący impuls laserowy „polaryzuje” atomy poprzez obsadzenie specyficznych stanów spinowych, a laserowy impuls próbkujący odczytuje precesję spinu, uzyskując sygnał pomiarowy proporcjonalny do pola magnetycznego.

Obszarem aktualnych badań rozwojowych ultra czułej magnetometrii jest bezrelaksacyjna magnetometria wymiany spinu, technika SERF, lub magnetometria atomowa. Techniki magnetometrii optycznej i atomowej rozwijają się intensywnie od wielu lat. Klasyczna magnetometria optyczna stosuje różne techniki optyczne w celu pomiaru magnetyzacji. Wykorzystuje się zjawiska magneto-optyczne w materiałach. Można wymienić tutaj magnetometrię Kerra i Faradaya. W magnetometrze Kerra światło oddziałuje np. z namagnesowaną powierzchnią i wiązka odbita posiada polaryzację eliptyczną mierzoną przez detektor. W magnetometrze Faradaya magnetyzacja materiału jest mierzona nieliniową rotacją magneto-optyczną. Magnetyzację materiału magnetycznego, nieprzezroczystego mierzy się nakładając cienką warstwę modulatora Faradaya i badając polaryzację światła odbitego. Możliwe jest wówczas mapowanie powierzchniowe. Do grupy magnetometrii optycznej należy także metoda optycznej detekcji rezonansu magnetycznego ODMR.

Między metodami optycznymi i atomową występują podobieństwa i różnice. W odróżnieniu od takich technik magnetometrii optycznej jak Kerra i Faradaya, bezrelaksacyjny magnetometr wymiany spinu, lub w skrócie także atomowy stosuje wieloprzejściową (także jednoprzejściową w rozwiązaniu klasycznym) komórkę optyczną z gazem atomowym gdzie detekowana jest zmiana absorpcji propagowanej wiązki laserowej. Magnetometry atomowe na parach rubidu i cezu, a później metali alkalicznych, są znane i stosowane od kilkudziesięciu lat, jednak dopiero ostatnie postępy w poprawie czułości i

miniaturyzacji doprowadziły do budowy urządzeń kompaktowych nie wymagających chłodzenia kriogenicznego. Zalety magnetometrii atomowej to możliwość pomiaru pól magnetycznych wiele rzędów wielkości mniejszych od pola magnetycznego Ziemi, i brak wymagań dokładnego ekranowania magnetycznego od pola ziemskiego.

Zarówno metoda bez-relaksacyjnej magnetometrii wymiany spinu jak i optyczna detekcja rezonansu magnetycznego stosują zasadę optycznego pompowania i następnie próbkowania. Próbkowanie w metodzie wymiany spinu, w najprostszym tzn. fundamentalnym rozwiązaniu magnetometru, jest wykonywane przez ten sam laser, czyli jedną wiązką, najpierw polaryzującą a następnie odczytującą. Podczas próbkowania w metodzie rezonansu magnetycznego stosowane są dwie oddzielne prostopadłe do siebie wiązki laserowe w celach pompowania i próbkowania. Mimo tej różnicy metody wydają się na pierwszy wygląd podobne do siebie. Obie metody mają jednak inne charakterystyki, a więc 'wrodzone' wady i zalety.

Ogólnie, magnetometry atomowe posiadają wiele cech korzystnych. Jednak skalarnie magnetometry atomowe posiadają relatywnie małą czułość. A tutaj chodzi o docelową konstrukcję urządzeń o czułości np. sub-femto-teslowej  $fT/Hz^{1/2}$ , np. czujnika opisanego w publikacji Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells, PRL 110, 160802 (2013). W celu poprawy czułości stosuje się bardziej zaawansowane architektury optyczne magnetometru, a w tym podwójne (lub nawet wielokrotne), wieloprzejściowe komórki optyczne, oraz wielokrotne, optymalizowane techniki pompowania i próbkowania. Metoda pomiarowa pompy i próbki jest optymalizowana w kierunku stłumienia relaksacji wymiany spinu, ale także umożliwienia indywidualnego i niezależnego doboru parametrów wiązki pompującej i odczytującej. Role obu wiązek są inne w odniesieniu do ośrodka czynnego. Jedna silniej oddziałuje z ośrodkiem energetycznie, druga wręcz przeciwnie, nie powinna oddziaływać. Stosowane są wielokrotne impulsy próbkujące (przynajmniej dwa) w celu pomiaru czasu przejścia przez zero precesji spinu z rozdzielczością sub-pikosekundową. Ograniczeniem kwantowym dla skalarnego magnetometru atomowego pracującego w warunkach ciągłych są kolizje z wymianą spinu. Praca w warunkach wysoko-rodzielczego próbkowania pozwala na ominięcie tego ograniczenia, stąd nazwa metody – 'bez-relaksacyjna'. Układ próbkowania musi być na tyle szybki, tzn. o tak znacznej rozdzielczości czasowej, aby pomiary były wykonane, nawet wielokrotnie w czasie krótszym od np. 1 ms, dla atomów rubidu, od pobudzenia pompą, znacznie przed czasem uruchomienia naturalnych mechanizmów relaksacji spinu – które stanowią podstawowe ograniczenie szumowe w takim układzie pomiarowym. Fundamentalną zaletą stosowania próbkowania o dużej rozdzielczości czasowej jest uniezależnienie w pewnym zakresie od wartości zewnętrznego pola magnetycznego ziemskiego.

Oczywiście czułość magnetometru zależy także od mierzonej objętości, stąd konieczność wielo-przejściowości, i/lub zwielokrotnienia komórek pomiarowych. Zwiększenie drogi oddziaływania zwiększa poziom sygnału pomiarowego.

Ograniczenia szumowe metod SERF i ODMR są zasadniczo różne, z czego biorą się różne wartości czułości. Czułość SERF ogranicza relaksacja spinu spowodowana destrukcyjnymi kolizjami. Czułość ODMR ogranicza czułość szumowa detekcji wiązki

próbkującej, czyli poziom amplitudowego szumu śrutowego. Wiązka próbkująca odczytuje także fluktuacje amplitudowe wiązki pompującej. Te fluktuacje nie powinny być większe niż szum śrutowy. Magnetometr SERF pracuje w dostatecznie wysokiej temperaturze, że szybkość wymiany spinu w dostatecznie gęstym ośrodku jest większa niż częstotliwość precesji w dostatecznie małym polu magnetycznym. Indywidualny atom podlega zmianie precesji tylko o mały kąt pomiędzy kolizjami i w rezultacie wszystkie atomy posiadają tą samą precesję w jednym kierunku. Atomy w dwóch subtelnych poziomach sprzęgają się podczas precesji, i kolizje z wymianą spinu nie powodują dalszej relaksacji spinu, ponieważ precesja całego zbioru atomów jest koherentna. Magnetometr SERF pracuje optymalnie w wyższej temperaturze i w niewielkim polu magnetycznym, czego rezultatem jest wysoka czułość spowodowana mniejszą relaksacyjną wymianą spinu atomowego.

### **Zagadnienie naukowe rozpatrzone w pracy**

Abstrahując nieco od stwierdzeń Autora pracy doktorskiej, można bardziej ogólnie powiedzieć, że zagadnieniem naukowym i technicznym rozpatrzonym w pracy jest ciągle doskonalenie znakomitego koronnego urządzenia (w postaci zestawu laboratoryjnego) jakim dysponuje Zakład Fotoniki Instytutu Fizyki UJ, czyli optycznego magnetometru atomowego Faradaya z jednoprzejściową komórką z parami Rubidu. Widać że praca nad układem pomiarowym jest wspomagana przez Zespół Badawczy z AGH. Podstawowa architektura tego magnetometru została przedstawiona przez Zespół Badawczy pod kierownictwem prof. Wojciecha Gawlika, z udziałem dr Szymona Pustelnego w roku 2009 [PLP 1(1), 34-36 (2009)]. Początek prac datuje się na znacznie wcześniej. Cały czas układ pomiarowy jest rozwijany, jak to bywa w środowiskach akademickich z aktywnym udziałem doktorantów. To jest właśnie taki przypadek. Z przedstawionej pracy doktorskiej, która opisuje, po stosownych wstępach i bardziej ogólnym opisie przestrzeni badawczej, solidny autorski udział Doktoranta, wynika że zaangażował się On znacznie w postawione zadanie, odpowiednio dla poziomu pracy doktorskiej. Doskonalenie tak złożonego układu i dość subtelny pod względem pomiarowym, wymagającego znacznej wiedzy fizycznej i inżynierskiej, polega na ogół na wykonaniu szeregu większych i mniejszych kroków w konkretnym, wybranym wcześniej kierunku rozwojowym. Potem, na weryfikacji efektu tych kroków, jak to dzieje się w laboratoryjnych poszukiwaniach badawczych, czy były właściwe. Wymieniony cykl badawczy jest widoczny w ocenianej pracy doktorskiej, choć pokazano tylko kroki zakończone sukcesem, pomijając pewnie napotkane poszukiwania nietrafione. Doskonalenie budowy atomowego magnetometru Faradaya jest niewątpliwie zagadnieniem naukowym, tym bardziej że Autor wykonał szereg ciekawych kroków modernizacyjnych - teoretycznych związanych z modelowaniem układu, oraz laboratoryjnych związanych z zastosowaniem wiązki światła o rotującej polaryzacji liniowej. Te prace przyczyniły się między innymi do polepszenia parametrów szumowych magnetometru skalarnego.

## **Teza rozprawy**

Przedstawiona przez Doktoranta teza jest sformułowana wieloczęściowo i w zasadzie dotyczy uzyskanych najciekawszych wyników. Po pierwsze, Autor modelował magnetometr jako układ zastępczy RLC i uzyskał potwierdzenie, zgodność charakterystyk teoretycznych i eksperymentalnych. Po drugie, Autor zastosował konkretne, optymalne w tym przypadku, modulowanie pompującej wiązki światła w celu rozszerzenia dynamiki pomiarowej magnetometru. W innym przypadku możliwość pomiaru małych pól jest okupiona małą dynamiką. Po trzecie, Autor zasygnalizował dalsze obiecujące kierunki prac nad sensorem, i wykonał wstępne kroki techniczne, polegające na jego usieciowieniu globalnym ze stemplem lokalizacyjnym i atomowym stemplem czasowym danych pomiarowych, a tym samym odpowiednią synchronizacją.

## **Sformułowanie zagadnienia naukowego przez autora i charakter pracy**

Podstawowe sformułowanie zagadnienia naukowego, w postaci wyliczenia i opisu jednak w formie dość skrótowej, zadań modelowania i modernizacyjnych układu pomiarowego magnetometru znajdujemy we wstępie pracy. Potem autor rozwija te sformułowania w poszczególnych częściach pracy we wstępie do poszczególnych rozdziałów. Do takiej formy przedstawienia zagadnienia naukowego nie mam zastrzeżeń. Uważam, że jest prawidłowa. Praca ma głównie charakter doświadczalny, pomiarowy, laboratoryjny (modernizacja stanowiska pomiarowego, prace laboratoryjne, wykonanie pomiarów) jednak z niezbędną i stosowną warstwą projektową i teoretyczną (projekt modernizacji, modelowanie, interpretacja wyników pomiarów).

**2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

W pracy zamieszczono 64 odnośniki literaturowe. Dotyczą one następujących głównych grup zagadnień (omijam tematyką pomocniczą jak cyfrowe przetwarzanie sygnałów czy metody modulacji światła): wielkoskalowe eksperymenty badawcze z zastosowaniem magnetometrów, przegląd rodzajów ultra-czułych magnetometrów w tym atomowa magnetometria optyczna, zaawansowane techniki optyki w tym nieliniowej, ultra-precyzyjna synchronizacja czasu, przegląd prac Zespołu Badawczego w którym działa Doktorant dotyczących realizowanej pracy doktorskiej, zbiór prac nad analogicznymi rozwiązaniami optycznego magnetometru atomowego. Odnośniki literaturowe są umieszczone głównie we wstępie pracy gdzie Autor dokonuje przeglądu dziedziny. Potem najczęściej powołuje się na prace Zespołu Badawczego w którym realizuje prace, oraz na pewne prace dotyczące np. analogicznych rozwiązań magnetometrów i precyzyjnej synchronizacji sieci czujników pomiarowych.

Uważam, że w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań magnetometrów, w tym klasy optycznych magnetometrów atomowych. Dokonany w pracy przegląd literatury przedmiotu świadczy o dobrej wiedzy autora. Wnioski w przeglądzie źródeł są sformułowane w sposób jasny i przekonujący, oraz doprowadziły autora do wyboru, zapewne we współpracy z opiekunami naukowymi, właściwego kierunku prac nad rozwojem zestawu laboratoryjnego optycznego atomowego magnetometru Faradaya.

Główne wyniki prac autora, zaprezentowane w pracy doktorskiej, dotyczące modelowania i weryfikacji z wynikami laboratoryjnymi, zostały opublikowane w pracy zbiorowej, gdzie doktorant jest pierwszym autorem, w repozytorium arXiv.org 1201.3636 [<https://arxiv.org/vc/arxiv/papers/1201/1201.3663v2.pdf>] pt. Ultra-sensitive broad-dynamic range optical magnetometer with instant response to magnetic field changes. Artykuł ten nie jest cytowany w pracy doktorskiej, gdyż jak to bywa w repozytorium arXiv jest wcześniejszym preprintem artykułu opublikowanego w czasopiśmie archiwalnym, ale pod innym tytułem – Modeling an optical magnetometer with electronic circuits – analysis and optimization. Dokładny opis magnetometru o wdzięcznej nazwie kodowej AMOR jest umieszczony w pracy Shot-noise limited magnetometer with sub-pT sensitivity at room temperature, arXiv [quant-ph] 1403-7796, także nie cytowanej w pracy. Cytowana jest jednak fundamentalna praca [GAW06] z roku 2006. Praca [GAW06] dotyczy jednak bardziej zjawiska niż instrumentu. Cytowana jest praca [PUS08] z opisem analogicznych rozwiązań magnetometrów. Jest to istotne ponieważ praca doktorska dotyczy rozwoju tego stanowiska pomiarowego samo-oscylacyjnego magnetometru rezonansowego ze śledzeniem rezonansu AMOR i jego modyfikacji w pewnym wybranym kierunku. Praca w 1403-7796 arXiv opublikowana w listopadzie 2014 roku mówi o uzyskaniu limitu czułości normalizowanej do pasma na poziomie 70 fT dla pola na poziomie 7,6  $\mu\text{T}$ . Autor w pracy doktorskiej uzyskuje w magnetometrze AMOR i w magnetometrze modyfikowanym z rotacją polaryzacji czułości w okolicach 1 pT. Czułość jest zawsze normalizowana do pasma. Wydaje się że ograniczenie szumowe badanych obu wersji magnetometru przez Doktoranta nie wynika z ograniczeń fundamentalnych, a raczej z właściwości układu pomiarowego i dostępnej aparatury laboratoryjnej.

### **3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Przebieg realizowanej przez Doktoranta pracy badawczej jest następujący. Tworzy i weryfikuje model zastępczy magnetometru. Model jest relatywnie prosty, aż budzi pytania co do swojej prostoty, ale jak się okazuje niezwykle skuteczny. Prostota i skuteczność jest spowodowana wyborem rezonansowej i nadążnej częstotliwościowo metody pracy urządzenia, co znacznie upraszcza analizy. Przed utworzeniem modelu pokazuje tryby pracy i konfiguracje magnetometru AMOR, wyjaśniając podstawowe zjawiska i podając podstawowe zależności.

Przeprowadza obliczenia symulacyjne dla poszczególnych opisanych konfiguracji

magnetometru – jedno i dwuwiazkowych i z różnymi polaryzatorami. Ważną częścią pracy, ale jednak o charakterze pomocniczym, jest bardzo dokładne opisanie magnetometru AMOR, który podlega badaniom, charakteryzacji, rozwojowi i modyfikacjom autorskim, oraz pomiarom. Autor opisuje właściwości poszczególnych składowych urządzenia: komórki czynnej magnetoptycznie, ekranu magnetycznego z solenoidem, źródeł światła wraz z ich kontrolą, zewnętrzny modulator akustooptyczny do modulacji pompy optycznej, detektor i układy elektroniczne, oraz całość zestawu urządzenia.

Wykonuje pomiary w układzie AMOR w dwóch rodzajach pracy z wymuszeniem częstotliwości modulacji pompy optycznej oraz w trybie generatora w którym częstotliwość jest określona przez parametr mierzony – wartość pola magnetycznego. Tworzy mapę czułości magnetometru w funkcji położenia punktu pracy określonego przez parametry optycznych wiązek pompującej i próbkującej. W rozwiązaniu samo-oscyłacyjnym do modulacji wiązki pompującej stosuje zamiast modulatora akustooptycznego interferometr.

Analogiczne prace powtarza dla innej, alternatywnej konstrukcji magnetometru z rotującą polaryzacją. Pokazuje zalety takiej oryginalnej architektury pomiarowej, a w szczególności to, że ośrodek pompowany jest ciągle i wszystkie spiny wirują ze zgodną fazą. W porównaniu z magnetometrem AMOR spin wypadkowy nie maleje pomiędzy kolejnymi cyklami pompowania. Przedstawia ciekawy, prosty i autorski sposób wytwarzania światła o ciągle rotującej polaryzacji. Wykonuje układ optyczny i jego sterownik elektroniczny realizujący skutecznie funkcje polaryzatora wytwarzającego rotującą polaryzację.

W układzie z rotującą polaryzacją wykonuje pomiary magnetometryczne, jak poprzednio dla układu AMOR. Różnica laboratoryjna polega jedynie na wstawieniu w układ polaryzatora rotującego dodatkowego polaryzatora. Podobnie jak dla układu AMOR wykonano mapę czułości dla pola w okolicach wartości pola magnetycznego Ziemskiego. Optymalne warunki pracy uzyskuje dla mocy wiązek pompującej i próbkującej ok. 20  $\mu$ W, podobnie jak dla urządzenia AMOR. Uzyskuje tutaj lepsze właściwości szumowe niż w AMOR. Zmieniając pole magnetyczne uzyskuje stabilną pracę układu w obszarze 100 – 700 kHz. Przy pomocy skonstruowanego sterownika o nazwie Rotpol rozszerza zakres pomiarowy do 4 kHz – 1 MHz. Analizuje warunki stabilności pracy układu zależne od dryfu fazy wprowadzanej przez interferometr i zależność przesunięcia fazy od geometrii układu optycznego.

Porównuje oba magnetometry ze sobą w jednakowych warunkach pracy. Uzyskuje oczywisty wynik silniejszego sygnału w urządzeniu z rotującą polaryzacją. Sygnał rezonansowy jest dwukrotnie większy. Oba magnetometry są przeznaczone do pomiarów relatywnie niewielkich pól magnetycznych. Czułość obu magnetometrów zmniejsza się wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego, jednak cały czas oryginalne rozwiązanie z rotacją polaryzacji wykazuje przewagę sygnałową i szumową nad rozwiązaniem odniesienia AMOR.

W części pracy dotyczącej zastosowania badanych magnetometrów pokazuje potencjał odkrywczy ich zastosowania w budowie globalnej sieci detekcyjnej ciemnej materii i

ciemnej energii. Ultraczuła globalna sieć magnetometrów może potencjalnie odkryć subtelne skalarnie zaburzenia polowe pochodzące od zjawisk z poza Modelu Standardowego. Zespół Naukowy w którym działa Doktorant uczestniczy w dużym międzynarodowym programie GNOME budowy globalnej sieci pomiarowej. Doktorant konstruuje fragment systemu w postaci adekwatnego interfejsu Internetowego do magnetometru koniecznego do jego usieciowienia i podłączenia do systemu GNOME. Ten wysiłek aplikacyjny, polegający na budowie działającego rejestratora danych pomiarowych synchronizowanego z czasem GPS, jest pięknym ukoronowaniem pracy doktorskiej. W interfejsie sieciowym konstruuje część analogową i analizuje błędy oraz uzyskaną precyzję synchronizacji. Pokazuje przykłady rejestracji danych. Montuje kilka egzemplarzy interfejsu – rejestratora, które zostały rozlokowane w różnych docelowych miejscach budowanej globalnej sieci pomiarowej.

Podsumowując, autor rozwiązał postawione zagadnienia, użył właściwych metod do ich rozwiązania, oraz wykazał że przyjęte założenia były uzasadnione.

#### **4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

Praca posiada dwie warstwy naukową i techniczną. W warstwie naukowej autor modelował układ magnetometru pracującego w rezonansowym trybie pracy, weryfikował pozytywnie model i pomiary, opracował oryginalną koncepcję rotacji polaryzacji i jej zastosowania w magnetometrze. W warstwie naukowo-technicznej autor wykonał układ rotatora polaryzacji w części optycznej i elektroniczny sterownik dla niego, przeprowadził cały szereg niezbędnych prac technicznych, laboratoryjnych, i pomiarowych. Samodzielny, oryginalny naukowy i merytoryczny ładunek pracy jest adekwatny do poziomu prac doktorskich w dziedzinie nauk technicznych. Pozycja rozprawy do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową jest bardzo aktualna. Zabudowany magnetometr bierze udział w globalnej sieci pomiarowej zjawisk poza MS.

#### **5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Nie mam zastrzeżeń co do poprawności redakcyjnej pracy. Pochwalam uzupełnienie każdego rozdziału o krótkie podsumowanie na końcu. Zwiększa to czytelność pracy i ułatwia określenie stopnia samodzielności i oryginalności autorskiej pracy. A więc przekonuje recenzenta do uzyskanych przez siebie wyników. Praca jest zwięzła, jasna i poprawna redakcyjnie. Zawiera to co potrzebne w pracy doktorskiej, nic ponadto.



### **Pytania do Doktoranta:**

Idea magnetometru AMOR ma dziesięć lat. Dlaczego do niej wrócono?

Skąd wynika poziom szumów w obu magnetometrach w okolicach pT? Jakie jest ograniczenie techniczne, a jakie fundamentalne w tych konkretnych układach?

Dlaczego zdecydowano się na rozwiązanie z rotacją polaryzacji skoro uzyskano dwukrotny wzrost czułości wobec układu AMOR a nie np. o rząd wielkości? Czy nie jest to ćwiczenie akademickie?

Czy jakość stosowanych w układach laboratoryjnych wiązek laserowych była dostatecznie duża?

Dlaczego nie zastosowano komórki wieloprześciowej? Koszty, trudności techniczne, itp.?

### **6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Praca nie posiada istotnych słabych stron i wad merytorycznych. Moje wątpliwości zawarłem w pytaniach do Doktoranta.

### **7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?**

Potencjalna przydatność rozprawy dla nauk technicznych jest znaczna. Jednak Autor pracuje na zestawie całkowicie laboratoryjnym, zupełnie nieadekwatnym do zastosowań technicznych. Niektóre fragmenty elektroniki wykonuje jednak w postaci zwartej wykazującej pewien potencjał techniczny. Budowa tak skomplikowanego i wymagającego układu w wersji technicznej aplikacyjnej jest zupełnie odrębnym zagadnieniem, które nie było przedmiotem niniejszej pracy. Znaczna potencjalnie przydatność wyników pracy jest tutaj rozważana w aspekcie relatywnie niskiego kosztu zestawu, braku urządzeń kriogenicznych, itp.

### **8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

#### **d/ spełniająca wymagania z nadmiarem**

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów procesu doktoryzowania. Jestem gotów uznać pracę za wyróżniającą się w zależności od przebiegu obrony, prezentacji i dyskusji związanej z realizacją pracy.

