

dr hab. inż. Jarosław Sotor, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 71 320 48 32,
e-mail: jaroslaw.sotor@pwr.edu.pl

Wrocław 20.02.2025r

**Review of the doctoral dissertation by Mgr. Mehrdad Zarei, titled:
"Towards Autonomous Operation of Optical Atomic Clocks and Tweezers
Machine"**

The doctoral dissertation by Mgr. Mehrdad Zarei's thesis, titled "Towards Autonomous Operation of Optical Atomic Clocks and Tweezers Machine," was conducted at the Department of Atomic, Molecular, and Optical Physics, Faculty of Physics, Astronomy, and Informatics, Nicolaus Copernicus University in Toruń, under the supervision of dr hab. Michał Zawada and dr inż. Piotr Morzyński. The doctoral candidate carried out his experiments at the National Laboratory of Atomic, Molecular and Optical Physics (FAMO), where the only optical atomic clocks in Poland are operational. This interdisciplinary work focuses on the practical application of modern electronics and computer science solutions to automate the functioning of complex optical systems, such as the optical atomic clock and tweezers. Utilizing these systems, automated for self-sustained and long-term operation, the doctoral candidate demonstrated: *i)* clock spectroscopy of strontium atoms, measuring their temperature in the ground state in an optical lattice and the width of the clock transition, and *ii)* spectroscopy of the Rydberg transition in strontium atoms when excited at a wavelength of 316.5 nm. The subject of the dissertation undoubtedly qualifies as a scientific discipline in physical sciences. Due to the realization of the doctoral work within a unique research infrastructure on a global scale, the results obtained by the doctoral candidate are inherently original. It should be emphasized that implementing a series of electronic and software solutions allowed for the long-term and autonomous operation of the optical atomic clock, enabling the widespread use of stable clock signals with significantly reduced involvement of highly qualified personnel. All activities conducted in this direction are important in the context of developing portable optical atomic clocks and the future redefinition of the second.

The dissertation is English and comprises 115 pages, divided into 7 chapters. The work is complemented by 4 appendices presenting the technical details of the solutions developed by the doctoral candidate and a bibliography containing 105 references. According

to the data in the Scopus database, the doctoral candidate is a co-author of 7 indexed works (1 article in Measurement Science and Technology and 6 conference papers). This scientific output has been cited 4 times so far.

Characterization and substantive evaluation of the work.

In the introduction, the author briefly overviews key technical solutions and research methods, whose skillful combination allows for the practical implementation of optical atomic clocks and tweezers. Highlighting the high degree of complexity of these research systems, which hinders their long-term and stable operation, the doctoral candidate defined the thematic scope of the dissertation and its main goal, which was to develop an autonomous control system for the optical atomic clock, particularly through the implementation of procedures for automatic stabilization and re-stabilization of lasers, remote control of the direct digital synthesis (DDS) system, and Helmholtz coils in the magneto-optical trap. Considering the systemic complexity of the optical atomic clock, in my opinion, the goal of the work was very ambitious.

In the second chapter, which is the only theoretical chapter of this dissertation, the doctoral candidate, based on a literature review, presents detailed information about the elements that determine the feasibility of optical atomic clocks, such as magneto-optical traps, spectroscopy of strontium atoms, and dipole traps. The information presented here describes the operation of optical atomic clocks from a physical perspective. The task set by the doctoral candidate primarily focuses on technical issues that determine the stable operation of such a physical system. In my opinion, this theoretical part lacks an introduction to the theory and techniques of laser frequency stabilization, which were critical for the work carried out by the doctoral candidate. The quality of the theoretical introduction would also be significantly enhanced by reviewing optical atomic clock solutions and analyzing the stability and autonomy of competing clock infrastructures. This data would provide a perfect reference point for the results obtained in this doctoral work.

In the next chapter, the doctoral candidate presents the results of his work aimed at developing an automated system for controlling the current flowing through the coils in the magneto-optical trap system. The control system was implemented using a commercially available solution with an STM32 microcontroller. The doctoral candidate developed and implemented a proprietary algorithm for controlling and regulating the current flow through the coil system. The description of the technical solution can be considered sufficient, however, the presentation of the operation and parameters of the entire control system leaves many ambiguities, e.g., lack of information on the resolution and precision with which the

current value flowing through the coils can be changed (in reference to the magnetic field stability requirements in the magneto-optical trap), lack of analysis of current noise in the implemented stabilization system. It would have been advisable to compare the solution developed by the doctoral candidate with the one previously used in the FAMO laboratory. How did the implemented control system affect the quality of the magneto-optical trap operation and, consequently, the optical atomic clock?

In the fourth chapter, mgr Zarei presents the results of his work on developing a remote control system for a commercial DDS platform. It allows for remote changing of the parameters of the DDS system using Ethernet communication. The presented description contains a number of detailed technical and engineering information, which completely omits the quality of the generated signal (the operation of the DDS is illustrated by only one screenshot from the RF analyzer). In the introductory information, the doctoral candidate indicates that the applications of the DDS generator in the optical atomic clock system require frequency changes with a resolution at the level of μHz and switching times at the level of single milliseconds. However, he did not present a detailed characterization of the operation of the remotely controlled DDS system. Particularly important here is the analysis of phase noise as a function of reference frequency (according to the presented description, these can be frequencies of 100, 250, and 1000 MHz), as well as the analysis of higher harmonics (DDS systems typically do not generate an ideal sinusoidal signal with a fundamental harmonic – what is the permissible share of higher harmonics in the DDS output signal in clock applications?). The evaluation board AD9912 used by the doctoral candidate is also controlled by a commercial microcontroller system (Nucleo-H743ZI2). Is it possible to achieve the declared frequency resolution at the level of μHz ? Was it possible to achieve frequency switching times at the level of single milliseconds using such a multi-level system solution? What was the doctoral candidate's contribution to preparing the hardware solutions presented in Figures 4.1 and 4.2?

In the fifth chapter, the doctoral candidate presented the results of his work on the algorithm for automatic activation of the laser frequency stabilization loop, along with its physical implementation in the Python environment. The stabilization procedure was tested using external cavity diode lasers (ECDL) and a continuous-wave Ti:Sapphire laser. In his stabilization system, the doctoral candidate used two types of discriminators as the error signal source: a wavelength meter and an optical cavity. The control logic was also implemented in two ways: *i)* a PC equipped with an NI measurement card and *ii)* the RedPitaya FPGA platform. Through the conducted experiments, the doctoral candidate

demonstrated the effectiveness of the developed solution by showing the possibility of self-restoring the proper functioning of the frequency stabilization loop for ECDL and Ti:Sapphire lasers without the need for intervention by a qualified operator. The description of the control system is quite extensive. Still, several issues need to be addressed, namely: *i)* what was the parameters (finesse, FSR) of the optical cavity used as the frequency discriminator have?, *ii)* did the stabilization system use the edge or the transmission maximum of the cavity as the discriminator (if the maximum, how was the direction of frequency change detected as a function of the change in the signal level transmitted by the cavity)?, *iii)* how did the developed control algorithm identify the appropriate transmission maximum of the cavity to initiate the stabilization process? This chapter mainly focuses on the algorithmic approach to the frequency stabilization process (managing the locking process) without much commentary on the impact of this control on the quality of the achieved stabilizations, e.g., phase noise measurement. It would be very valuable to present such measurements for a selected laser with a classical implementation of the stabilization loop (using typically used PID controllers in laboratories, such as Vescent, Toptica, NewFocus) and compare them with the stabilization systems developed by the doctoral candidate (implementation with the NI measurement card and the RedPitaya platform) – especially considering that the doctoral candidate tested his algorithm at Toptica Company. How does the transition to a digital implementation of the PID controller affect the quality of frequency stabilization of the tested lasers? How does the digital implementation affect the noise of the error signal, which is directed to the current and/or PZT controllers in the used lasers?

In the subsequent two chapters, the doctoral candidate presents the results of the practical implementation of the solutions he developed in real measurement experiments. Notably, the automation of the optical atomic clock's operation is highlighted, where systems for controlling the coils in the magneto-optical trap, the DDS system controlling the acousto-optic modulators, and the parallel management system for the frequency stabilization loops of numerous lasers were implemented. The doctoral candidate verifies the usefulness and stability of the technical solutions he developed by performing demanding physical measurements, such as measuring the ground state temperature of Sr atoms trapped in an optical lattice, measuring the linewidth of the Sr clock transition, and optimizing the operation of the magneto-optical cell to maximize the number of trapped atoms. The culmination of the work on automating the optical atomic clock's operation is the measurement campaign conducted in 2022, which lasted nearly 30 days. The clock's performance was evaluated by measuring the frequency difference between the clock and the ultra-stable optical cavity. The

results were compared with the 2015 measurement campaign in the long term, achieving comparable system stability. Notably, the measurements conducted in 2022 in the automated system did not require laboratory personnel to maintain the clock's operation. This is an essential step towards developing portable optical clock systems, which are beginning to be worked on at UMK. In the presented material, as in the fifth chapter, I missed directly comparing the obtained Sr atom spectroscopy results with systems based on standard analog PID systems. Overall, does the transition to a digital control solution cause degradation of the Allan variance measured in Figure 6.35 in the short term (averaging times up to about 200 s)?

The automatic control system for laser frequency stabilization loops developed by the doctoral candidate was also used to conduct Rydberg state spectroscopy (implemented at the University of Amsterdam). Here, the control algorithm was implemented on the RedPitaya platform, which controlled the operating parameters of the 1550 nm ECDL laser, and as a result of two subsequent nonlinear processes, the light frequency in the 316 nm range. The obtained results confirm the effectiveness of the developed control algorithms. However, there is a lack of comparison of the obtained spectroscopic results with the current state of art and verification of the qualitative parameters of the conducted spectroscopy. The question remains as to which hardware implementations of the automatic locking system developed by the doctoral candidate (based on the NI measurement card or the RedPitaya platform) enable qualitatively better stabilization.

The main part of the dissertation concludes with a brief summary, in which the doctoral candidate repeats the content already presented in the introduction, where he outlined the content of the individual chapters. There is a lack of a summary that clearly and precisely indicates the most significant achievements of the doctoral candidate, especially considering that he was part of a large research team. In the earlier parts of the work, he indicated that other research group members carried out experiments or electronic solutions.

In preparing the content of the dissertation, the doctoral candidate conducted a proper analysis of the literature sources, which consist of publications and professional books as well as datasheets of the used electronics components. He correctly uses literature references in the content of the dissertation (apart from the comments made above). This indicates his good understanding of the research environment, conducting experiments using complex laser systems with frequency stabilization.

The editorial and graphic side of the work is at a reasonable level. An appropriate reference to the bibliography accompanies graphs borrowed from other works. Most of the

drawings and diagrams are prepared very clearly and informatively. However, the work also contains several illustrative photos that do not provide much specific information to the content of the dissertation (e.g., Figures 3.1, 4.1, 4.2, 4.6, 5.2, 5.4, 5.11, 7.5). In my opinion, in the experimental part, the prepared graphs are too large (it would be more effective to present the results in a two-column format as the doctoral candidate did in the theoretical part) and appear at a distance of 1-3 pages from the mention in the text, which makes reading the dissertation difficult. The three-level table of contents the doctoral candidate uses results in subsections consisting of 2-5 lines of text, e.g., subsections 5.2, 5.4, 6.1, 6.5, 7.4.

In my opinion, there is no doubt that the doctoral candidate **achieved the goal of the work**, which was to develop an autonomous control system for the optical atomic clock. The obtained original results and the "know-how" gained during the work are very valuable in the context of future work on portable optical atomic clocks and plans for the redefinition of the second. The scope of work carried out by the doctoral candidate should be appreciated, whose value from the point of view of a "pure" physicist may seem moderate. Actions aimed at automating and effectively maintaining the uninterrupted operation of complex physical experiments require knowledge of physical phenomena, technical skills, and much work related to optimizing and testing such infrastructures.

Detailed questions and critical remarks

In addition to the general comments presented above, resulting from the correctness of the research methodology and the reviewer's curiosity, I present below a few further questions and critical remarks:

- In Figure 6.29, the doctoral candidate presents experimental results with a theoretical fit. What methodology was used to calculate the fitting function, considering the random distribution of measurement points for the blue-shift band? What is the error in determining the frequency shift of the sidebands for such a fitting process to the experimental data? A similar situation applies to the data presented in Figure 6.32.
- In the descriptions concerning the control of the current flowing through the coils in the magneto-optical trap (e.g., p. 36), the doctoral candidate writes "the current changes in the range from -0.5 to 0.5 V". Here, the control signal changes, not the current value, which should be expressed in amperes.
- In Table 6.1, the doctoral candidate refers to the RF power supplied to the acousto-optic modulator in relative (percentage) terms. However, the absolute RF power value specified for 100% generated by the DDS is missing, which would allow for determining

the exact experimental conditions. Is the RF signal power generated by the DDS system dependent on the frequency of this signal?

These comments do not affect my positive assessment of the doctoral dissertation by Mgr. Mehrdad Zarei.

In summary, I state that the doctoral dissertation by Mgr. Mehrdad Zarei **meets the conditions** set by *the Act on the Scientific Title and Degrees and Degrees and Titles in the Field of Art*, and I request its admission to public defense.



PODPIS ZAUFANY

JAROSŁAW
SOTOR

03.03.2025 01:07:41 [GMT+1]

Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym



dr hab. inż. Jarosław Sotor, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 71 320 48 32,
e-mail: jaroslaw.sotor@pwr.edu.pl

Wrocław 20.02.2025r

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mehrdada Zarei pt.:
„Towards Autonomous Operation of Optical Atomic Clocks and Tweezers
Machine”

Praca doktorska mgr. Mehrdada Zarei pt. „Towards autonomous operation of optical atomic clocks and tweezers machine” została zrealizowana w Katedrze Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu pod promotorską opieką dr. hab. Michała Zawady i dr. inż. Piotra Morzyńskiego. Swoje eksperymenty Doktorant przeprowadził w Krajowym Laboratorium FAMO, gdzie działają jedyne w Polsce optyczne zegary atomowe. Praca ma charakter interdyscyplinarny i koncentruje się na praktycznym wykorzystaniu nowoczesnych rozwiązań z zakresu elektroniki i informatyki do automatyzacji funkcjonowania złożonych systemów optycznych takich jak: optyczny zegar atomowy i szczypce optyczne. Z wykorzystaniem zautomatyzowanych pod kątem samoistnego i długotrwałego działania układów Doktorant zademonstrował: *i)* spektroskopię zegarową atomów strontu mierząc ich temperaturę w stanie podstawowym w sieci optycznej oraz szerokość przejścia zegarowego oraz *ii)* spektroskopię przejścia rydbergowskiego w atomach strontu przy wzbudzaniu na długości fali 316,5nm. Tematyka rozprawy bez wątpienia kwalifikuje się do dyscypliny naukowej nauki fizyczne. Ze względu na realizację pracy doktorskiej, w ramach unikatowej w skali świata infrastruktury badawczej, uzyskane przez Doktoranta wyniki są z definicji oryginalne. Należy podkreślić, że implementacja szeregu rozwiązań elektronicznych i informatycznych pozwoliła na długotrwałą i autonomiczną pracę optycznego zegara atomowego, co daje możliwość powszechnego wykorzystania stabilnych sygnałów zegarowych z znaczącym ograniczeniem zaangażowania wysoko wykwalifikowanego personelu. Wszelkie działania prowadzone w tym kierunku są niezmiernie istotne w kontekście budowy przenośnych optycznych zegarów atomowych oraz przyszłej redefinicji sekundy.

Rozprawa została napisana w języku angielskim, liczy 115 stron, które podzielono na 7 rozdziałów. Całość pracy dopełniają 4 dodatki prezentujące szczegóły techniczne rozwiązań opracowanych przez Doktoranta oraz liczącą 105 pozycji bibliografia. Zgodnie z danymi

zawartymi w bazie Scopus Doktorant jest współautorem 7 indeksowanych prac (1 artykuł w Measurement Science and Technology oraz 6 prac pokonferencyjnych). Dorobek ten był cytowany do tej pory 4 razy.

Charakterystyka i merytoryczna ocena pracy.

We wprowadzeniu Autor dokonuje krótkiego przeglądu kluczowych rozwiązań technicznych i metod badawczych, których umiejętne połączenie pozwala na praktyczną realizację optycznych zegarów atomowych i szczypiec optycznych. Wskazując na duży stopień komplikacji tych układów badawczych, utrudniający ich długotrwałą i stabilną pracę Doktorant określił zakres tematyczny rozprawy i jej główny cel jakim było opracowanie autonomicznego układu sterowania optycznym zegarem atomowym, w szczególności poprzez implementację procedur automatycznej stabilizacji i restabilizacji laserów, zdalnej kontroli układu bezpośredniej syntezy częstotliwości (DDS) oraz cewek Helmholtza w pułapce magnetoptycznej. Biorąc pod uwagę złożoność układów optycznego zegara atomowego w mojej ocenie cel pracy był bardzo ambitny.

W rozdziale drugim, który stanowi jedyny teoretyczny rozdział tej rozprawy, Doktorant na bazie przeglądu literatury przedstawia informacje szczegółowe o elementach decydujących o możliwości realizacji optycznych zegarów atomowych takich jak: pułapki magnetoptyczne, spektroskopia atomów strontu, pułapki dipolowe. Zaprezentowane tutaj informacje opisują działanie optycznych zegarów atomowych od strony fizycznej. Zadanie jakie postawił sobie Doktorant w dużej mierze koncentruje się na zagadnieniach technicznych decydujących o stabilnej pracy takiego układu fizycznego. W tak przygotowanym wstępie teoretycznym, w mojej ocenie brakuje wprowadzenia w teorię techniki stabilizacji częstotliwości laserów, które były krytyczne dla prac przeprowadzonych przez Doktoranta. Jakość wstępu teoretycznego w znaczący sposób podniósłby również przegląd rozwiązań optycznych zegarów atomowych wraz z analizą stabilności i autonomiczności konkurencyjnych infrastruktur zegarowych – dane te stanowiłyby bardzo dobry punkt odniesienia dla wyników uzyskanych w tej pracy doktorskiej.

W kolejnym rozdziale Doktorant przedstawia wyniki swoich prac mających na celu opracowanie zautomatyzowanego systemu sterowania prądem płynącym przez cewki w układzie pułapki magnetoptycznej. Układ sterowania zrealizowany został z wykorzystaniem komercyjnie dostępnego rozwiązania układowego z mikrokontrolerem STM32. Doktorant opracował i zaimplementował autorski algorytm sterowania i kontroli przepływu prądu przez układ cewek. Sam opis rozwiązania technicznego można uznać za wystraszający, jednakże prezentacja sposobu działania i parametrów całego układu sterowania pozostawia wiele niedomówień, np. brak informacji z jaką rozdzielczością i precyzją możliwa jest zmiana wartości prądu płynącego przez

cewki (w odniesieniu do wymagań stabilności pola w pułapce magnetoptycznej), brak analizy szumów prądu w zrealizowanym układzie stabilizacji. Wskazane było przeprowadzenie porównania opracowanego przez Doktoranta rozwiązania z dotychczas stosowanym w laboratorium FAMO. Jak zaimplementowany układ sterowania wpłynął na jakość pracy komórki a w konsekwencji optycznego zegara atomowego?

W rozdziale czwartym Doktorant prezentuje efekt prac nad opracowaniem systemu zdalnego sterowania komercyjnym układem DDS. System ten pozwala na zdalną zmianę parametrów układu DDS z wykorzystaniem komunikacji Ethernet. Przedstawiony opis zawiera szereg szczegółowych informacji o charakterze technicznym i inżynierskim, które całkowicie pomijają jakość generowanego sygnału (działanie DDS zobrazowano jedynie jednym zrzutem z ekranu analizatora RF). W informacjach wstępnych Doktorant wskazuje, że zastosowania generatora DDS w układzie optycznego zegara atomowego wymagają zmiany częstotliwości z rozdzielczości na poziomie μHz i czasów przełączania na poziomie pojedynczych ms. Doktorant nie przedstawił dokładnej charakterystyki działania opracowanego zdalnie kontrolowanego układu DDS. Szczególnie istotna jest tutaj analiza szumu fazowego w funkcji częstotliwości odniesienia (wg przedstawionego opisu mogą to być częstotliwości 100, 250 i 1000 MHz), jak również analiza wyższych harmoniczných (układy DDS typowo nie generują idealnego sygnału sinusoidalnego z podstawową harmoniczną – jaki udział wyższych harmoniczných w sygnale wyjściowym DDS jest dopuszczalny w zastosowaniach zegarowych?). Wykorzystywany przez Doktoranta płyta ewaluacyjna AD9912 sterowana jest z również przez komercyjny układ z mikrokontrolerem (Nucleo-H743ZI2). Czy rzeczywiście możliwe jest uzyskanie deklarowanej rozdzielczości częstotliwości na poziomie μHz ? Czy z wykorzystaniem tak wielopoziomowego rozwiązania układowego możliwe było uzyskanie czasów przełączania częstotliwości na poziomie pojedynczych ms? Jaki był wkład Doktoranta w przygotowanie rozwiązań sprzętowych zaprezentowanych na rysunkach 4.1 i 4.2?

W rozdziale piątym Doktorant przedstawił wyniki swoich prac nad algorytmem automatycznego włączania pętli stabilizacji częstotliwości laserów wraz z jego fizyczną implementacją w środowisku Python. Testowanie opracowanej procedury stabilizacji odbywało się z wykorzystaniem laserów półprzewodnikowych z zewnętrznym rezonatorem (ECDL) oraz lasera pracy ciągłej Ti:Sapphire. W swoim układzie stabilizacji jako źródło sygnału błędu Doktorant wykorzystał dwa rodzaje dyskryminatorów: miernika długości fali oraz wnęki optycznej. Logika sterująca została zaimplementowana również sprzętowo w dwojaki sposób: i) komputera klasy PC wyposażonego w kartę pomiarową NI, ii) platformy FPGA RedPitaya. Na drodze przeprowadzonych eksperymentów Doktorant udowodnił skuteczność opracowanego

rozwiązania demonstrując możliwość samoistnego przywrócenia prawidłowego funkcjonowania pętli stabilizacji częstotliwości dla laserów ECDL i Ti:sapphire bez potrzeby ingerencji wykwalifikowanego operatora. Opis systemu sterowania jest dość obszerny jednakże pozostaje kilka zagadnień wymagających uzupełnienia, a mianowicie: *i)* jakie parametry (finezja, FSR) miała wnęka optyczna wykorzystana jako dyskryminator częstotliwości?, *ii)* czy do stabilizacji częstotliwości układ jako dyskryminatora wykorzystywał zboczne czy maksimum transmisyjne wnęki (jeżeli maksimum to w jaki sposób zrealizowano wykrywanie kierunku zmiany częstotliwości w funkcji zmiany poziomu sygnału transmitowanego przez wnękę)? *iii)* w jaki sposób opracowany algorytm sterowania identyfikował odpowiednie maksimum transmisyjne wnęki do zainicjowania procesu stabilizacji? Treść tego rozdziału głównie koncentruje się na algorytmicznym podejściu do procesu stabilizacji częstotliwości (zarządzanie procesem „lockowania”) bez większego komentarza pozostawiając wpływ tego sterowania na jakość zrealizowanych stabilizacji przez, np. pomiar szumu fazowego. Bardzo wartościowym byłoby przedstawienie takich pomiarów dla wybranego lasera z klasyczną implementacją pętli stabilizacji (z wykorzystaniem z typowo stosowanych w laboratoriach regulatorów PID typu, Vescent, Toptica, NewFocus) i porównanie ich z układami stabilizacji opracowanymi przez Doktoranta (implementacja z kartą pomiarową NI i platformą RedPitaya) – szczególnie, ze względu na fakt, że Doktorant testował swój algorytm w firmie Toptica. Czy i jak przejście na cyfrową implementację układu regulatora PID wpływa na jakość stabilizacji częstotliwości badanych laserów? Jak implementacja cyfrowa wpływa na szum sygnału błędu, który kierowany jest do sterowników prądu i/lub PZT w wykorzystywanych laserach?

W kolejnych dwóch rozdziałach Doktorant prezentuje efekty praktycznej implementacji opracowanych przez siebie rozwiązań w rzeczywistych eksperymentach pomiarowych. Na szczególne podkreślenie zasługuje tutaj fakt zautomatyzowania pracy optycznego zegara atomowego, gdzie zaimplementowane zostały układy: sterowania cewkami w pułapce magneto optycznej, układ DDS sterujący pracą modulatorów akustooptycznych oraz system równoległego zarządzania pętlami stabilizacji częstotliwości licznych laserów. Przydatność i stabilność opracowanych przez siebie rozwiązań technicznych Doktorant weryfikuje tutaj możliwością realizacji wymagających pomiarów fizycznych, np. pomiar temperatury stanu podstawowego atomów Sr uwięzionych w sieci optycznej, pomiar szerokości linii przejścia zegarowego Sr czy optymalizacja pracy komórki magneto optycznej ze względu na maksymalizację liczby pułapkowanych atomów. Zwieńczeniem prac nad automatyzacją pracy optycznego zegara atomowego jest przeprowadzona w 2022 roku kampania pomiarowa trwająca prawie 30 dni w ramach. Jakość działania zegara ewaluowano jako pomiar różnicy częstotliwości

zegara i ultrastabilnej wnęki optycznej. Uzyskane wyniki porównano z kampanią pomiarową z 2015 roku w ujęciu długoterminowym uzyskując porównywalną stabilność systemów. Co ważne pomiary przeprowadzone w 2022 roku w układzie zautomatyzowanym nie angażowały personelu laboratoryjnego do podtrzymania funkcjonowania zegara. W mojej ocenie jest to ważny krok w kierunku opracowania przenośnych układów zegarów optycznych nad, którymi prace właśnie rozpoczynają się w UMK. W przedstawionym materiale, tak samo jak to miało miejsce w rozdziale piątym, zabrakło mi bezpośredniego porównania uzyskanych wyników spektroskopii atomów Sr z układami bazującymi na standardowych analogowych układach PID. W ujęciu całościowym pojawia się tutaj pytanie czy przejście na cyfrowe rozwiązanie sterowania nie powoduje degradacji zmierzonej na rys. 6.35 wariancji Allana w ujęciu krótkoterminowym (czasy uśredniania do ok. 200 s)?

Opracowany przez Doktoranta system automatycznej kontroli pętli stabilizacji częstotliwości laserów, wykorzystany został również do przeprowadzenia spektroskopii stanów rydbergowskich (realizacja na Uniwersytecie Amsterdamskim). Tutaj algorytm sterowania został zaimplementowany na platformie RedPitaya, która kontrolowała parametry pracy lasera ECDL 1550 nm, a w efekcie kolejnych dwóch procesów nieliniowych częstotliwością światła w zakresie 316 nm. Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność działania opracowanych algorytmów sterowania. Brakuje tutaj jednak porównania uzyskanych wyników spektroskopowych z aktualnym stanem wiedzy i zweryfikowanie jakościowych parametrów przeprowadzonej spektroskopii. Otwarte pozostaje również pytanie, która ze zrealizowanych przez Doktoranta implementacji sprzętowych układu automatycznego „lockowania” (na bazie karty pomiarowej NI czy platformy RedPitaya) umożliwi uzyskanie jakościowo lepszej stabilizacji?

Właściwą część dysertacji kończy krótkie podsumowanie, w którym Doktorant przenosi treści zamieszczone już we wprowadzeniu gdzie przedstawiał zawartość poszczególnych rozdziałów. Brakuje podsumowania, które jasno i precyzyjnie wskazuje najważniejsze osiągnięcia Doktoranta, w szczególności biorąc pod uwagę fakt, że był on częścią dużego zespołu badawczego. Dodatkowo we wcześniejszych częściach pracy wskazywał na fakt, że część eksperymentów czy rozwiązań elektronicznych była realizowana przez pozostałych członków Grupy badawczej.

Przygotowując treść rozprawy Doktorant dokonał prawidłowej analizy źródeł literaturowych, na które składają się pozycje publikacyjne publikacje i książkowe oraz noty katalogowe wykorzystywanych układów elektronicznych. W sposób poprawny posługuje się odniesieniami literaturowymi w treści rozprawy (poza uwagami zgłoszonymi powyżej). Świadczy

to o jego dobrym rozeznaniu w środowisku badawczym realizującym eksperymenty wykorzystujące złożone systemy laserowe ze stabilizacją częstotliwości.

Strona edytorska i graficzna pracy jest na dobrym poziomie. Zapożyczone z innych prac ilustracje są każdorazowo opatrzone odpowiednim odniesieniem do bibliografii. Większość rysunków i wykresów przygotowano bardzo przejrzysto i informacyjnie chociaż praca zawiera również szereg zdjęć poglądowych, które nie wnoszą większych konkretnych informacji do treści rozprawy (np. rys 3.1, 4.1, 4.2, 4.6, 5.2, 5.4, 5.11, 7.5). W mojej opinii w części eksperymentalnej przygotowane ilustracje są zbyt duże (efektywniejsze byłoby prezentowanie wyników w trybie dwukolumnowym tak jak to Doktorant zrobił w części teoretycznej) i pojawiają się w dużej odległości 1-3 strony od wzmianki w tekście co utrudnia lekturę rozprawy. Zastosowany przez Doktoranta trójpoziomowy spis treści skutkuje pojawieniem się w pracy podrozdziałów składających się z 2-5 linii tekstu np. podrozdziały 5.2, 5.4, 6.1 6.5, 7.4.

W mojej opinii nie ulega wątpliwości, że **Doktorant zrealizował cel pracy** jakim było opracowanie autonomicznego układu sterowania optycznym zegarem atomowym. Uzyskane oryginalne wyniki i zdobyte w trakcie realizacji pracy „know-how” jest bardzo cenne w kontekście przyszłych prac nad przenośnymi optycznymi zegarami atomowymi i planami redefinicji sekundy. Należy docenić zakres prac zrealizowanych przez Doktoranta, których wartość z punktu widzenia „czystego” fizyka może wydawać się umiarkowana. Działania zmierzające do automatyzacji i skutecznego, nieprzerwanego działania skomplikowanych eksperymentów fizycznych wymagają nie tylko znajomości zjawisk fizycznych, ale również wielu kompetencji technicznych i dużego nakładu pracy związanej z optymalizacją i testowaniem takich infrastruktur.

Pytania szczegółowe i uwagi krytyczne

Oprócz uwag natury ogólnej, przedstawionych powyżej, wynikających z dbałości o poprawność prowadzenia badań naukowych oraz ciekawości recenzenta, poniżej przedstawiam kilka dalszych pytań i uwag krytycznych:

- Na rys. 6.29 Doktorant przedstawia wyniki eksperymentalne i dopasowuje do nich funkcję teoretyczną. Jaka metodologia dopasowania funkcji teoretycznej została zastosowana biorąc pod uwagę przypadkowy rozkład punktów pomiarowych zmierzona dla „niebieskiego” pasma? Jaki jest błąd wyznaczania częstotliwości przesunięcia wstęp boczných dla tak przeprowadzonego procesu dopasowania do danych eksperymentalnych? Podobna sytuacja dotyczy danych przedstawionych na rys. 6.32.

- W opisach dotyczących sterowania prądem płynącym przez cewki w pułapce magnetoptycznej (np. str. 36) Doktorant pisze „prąd zmienia się w zakresie od -0,5 do 0,5 V”. Zmienia się tutaj sygnał sterujący, a nie wartość prądu, która powinna być wyrażona w amperach,
- W tabeli 6.1, Doktorant w sposób względny (procentowy) odnosi się do wartości mocy RF podawanej na modulator akustooptyczny. Brak tu jednak wartości bezwzględnej mocy RF specyfikowanej dla 100% generowanej przez DDS co pozwalałoby na określenie dokładnych warunków eksperymentu. Czy moc sygnału RF generowana przez układ DDS jest zależna od częstotliwości tego sygnału?

Powyższe uwagi nie wpływają na moją pozytywną ocenę pracy doktorskiej mgr. Mehrdada Zarei.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr. Mehrdada Zarei spełnia** warunki stawiane przez *Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



PODPIS ZAUFANY

JAROSŁAW
SOTOR

03.03.2025 01:05:47 (GMT+1)

Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym