

Abstract

Obviously, this thesis on optical atomic clocks is not the first of its kind. Many excellent dissertations on strontium optical atomic clocks and optical clocks in general are readily available [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. I have used these theses extensively while researching for and writing my own doctoral thesis. It is my hope that my own thesis will contribute in some small way to this vast sea of excellent doctoral works and aid future young researchers when they start their journey into the field of optical atomic clocks.

This thesis will primarily focus on the work I (and other members of in POZA group at Nicolaus Copernicus University) have done during my 3 year stay with the group of prof. hab. Michał Zawada. In this thesis, I will do my best to clearly differentiate between my own work and work done by other members of the POZA team. As a dual PhD student, I've had the honor and the pleasure to be a member of two research groups. The first group is the Quantum technologies group (QT) lead by dr.sc. Ticijana Ban at Center for Advanced Laser Techniques (CALT) at the Institute of Physics in Zagreb, Croatia. The second group is the Polish optical atomic clock (POZA) group lead by prof. hab. Michał Zawada at Nicolaus Copernicus University in Toruń, Poland. When I first joined the POZA group, two bosonic optical clocks (which will be referred to as Sr 1 and Sr 2 in this thesis) were already fully operational. The construction of a third clock, which was to be based on effect of superradiance of strontium atoms in a blue magic wavelength lattice, was just beginning.

This thesis will be separated into six distinct chapters. Chapter 1 (which the reader is currently reading) covers the fundamentals of optical atomic clocks and introduces the terminology used in optical atomic clock physics such as accuracy, stability, fractional stability and so forth.

Chapter 2 provides the theoretical background of the steps required to achieve clock operation. It will introduce the basics of Doppler cooling and magneto-optical traps, as well as properties of the strontium atom and its isotopes. It will then focus on methods used in cooling of two different strontium isotopes - the bosonic ^{88}Sr and fermionic ^{87}Sr . It will then move on to introduction of optical lattices, their magic wavelengths and atomic polarizabilities of clock states of the strontium atom. It finally finishes with high-precision spectroscopy of the clock transition

in strontium and digital locking of the clock laser to the atomic line of the clock frequency.

Chapter 3 presents measurements of photoionization cross sections of atomic states used in optical clock cycle of ^{88}Sr . These photoionization cross sections were measured at the newly proposed blue magic wavelength. It will then present my own theoretical work on the study of feasibility of using blue magic wavelength optical lattice optical clocks. It will end by presenting my work of examining photoionization induced losses of atoms in blue magic wavelength optical lattice, the resulting constraints on blue magic wavelength lattice optical clocks and possible mitigation measures.

Chapter 4 presents experimental work done by myself and other members of POZA group on redesign and upgrading of Sr 1 optical clock to enable simultaneous (and intermittent) operation of both the bosonic and fermionic optical clock.

Chapter 5 presents results on my work on getting the fermionic optical clock in Sr 1 fully operational. It will examine the loading of the fermionic blue and red MOTs. Also, where feasible, it will make comparisons with its bosonic counterpart.

Chapter 6 will present the evaluation of systematic shifts (accuracy budget) for the bosonic optical clock in Sr 1 as part of our international March 2022 campaign.

Appendix A will show the work (in form of published articles) I've done (in collaboration with other members of the QT group) on cooling of ^{87}Rb and ^{85}Rb using a frequency comb, as well as the examination of frequency-comb-induced radiation pressure force in dense atomic clouds.

Keywords: cold atoms, strontium optical atomic clock, blue magic wavelength, blue magic wavelength optical atomic clock, photoionization

Wprowadzenie

Przedstawiana dysertacja oczywiście nie jest pierwszą tezą napisaną o optycznych zegarach atomowych. Wiele doskonałych rozpraw na temat optycznych zegarów strontowych i ogólnie optycznych zegarów atomowych jest łatwo dostępnych [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Szeroko korzystałem z tych tez podczas badań i pisania własnej pracy doktorskiej. Mam nadzieję, że moja własna praca przyczyni się w jakiś niewielki sposób do tego ogromnego morza doskonałych prac doktorskich i pomoże przyszłym młodym badaczom, gdy rozpoczną swoją podróż w dziedzinie optycznych zegarów atomowych. Teza ta skupi się przede wszystkim na pracy, którą ja (i inni członkowie grupy POZA na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu) wykonaliśmy podczas mojego 3-letniego pobytu w grupie dr. hab. Michała Zawady. W tej pracy postaram się wyraźnie odróżnić pracę własną od pracy innych członków zespołu POZA. W czasie pracy nad podwójnym doktoratem miałem zaszczyt i przyjemność być członkiem dwóch grup badawczych. Pierwsza grupa to grupa technologii kwantowych (QT) kierowana przez dr. sc. Ticijanę Ban w Centrum Zaawansowanych Technik Laserowych (CALT) w Instytucie Fizyki w Zagrzebiu, Chorwacja. Druga grupa to grupa polskiego optycznego zegara atomowego (POZA) kierowana przez dr. hab. Michała Zawadę, prof. UMK, na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Kiedy po raz pierwszy dołączyłem do grupy POZA, dwa bozonowe zegary optyczne (które w tej pracy będą określane jako Sr1 i Sr2) były już w pełni sprawne. Budowa trzeciego zegara, który miał bazować na efekcie nadpromienistości atomów strontu w sieci o niebieskiej magicznej długości fali, dopiero się zaczynała.

Ta teza została podzielona na sześć rozdziałów. Rozdział 1 (który czytelnik obecnie czyta) obejmuje opis podstaw optycznych zegarów atomowych i wprowadzenie terminologii stosowanej w fizyce zegarów atomowych, takiej jak dokładność, stabilność, stabilność względna i tak dalej. Rozdział 2 zawiera teoretyczne podstawy kroków wymaganych do skonstruowania optycznego zegara atomowego. W rozdziale przedstawione są podstawy chłodzenia dopplerowskiego i pułapki magnetoptycznej, a także właściwości atomu strontu i jego izotopów. Dalszy opis skupia się na metodach stosowanych w chłodzeniu dwóch różnych izotopów strontu - bozonowego ^{88}Sr i fermionowego ^{87}Sr . Następnie wprowadzone są pojęcia sieci optycznej, magicznych dłu-

gości fal i polaryzowalności atomowej stanów zegarowych atomu strontu. Rozdział kończy się opisem precyzyjnej spektroskopii przejścia zegarowego w stronczie. Po zlokalizowaniu przejścia laser zegarowy jest cyfrowo stabilizowany do linii atomowej przejścia zegarowego.

Rozdział 3 przedstawia pomiary przekrojów fotojonizacyjnych stanów atomowych stosowanych w cyklu zegara optycznego ^{88}Sr . Przekroje te zostały zmierzone przy stosunkowo niedawno zaproponowanej niebieskiej magicznej długości fali. Następnie przedstawiona jest moja własna praca teoretyczna na temat możliwości wykorzystania optycznych zegarów atomowych z siecią optyczną o niebieskiej magicznej długości fali. Rozdział kończy się przedstawieniem mojej pracy badającej straty atomów wywołane fotojonizacją w sieci optycznej o niebieskiej magicznej długości fali, wynikające z tego ograniczenia optycznych zegarów atomowych i możliwe środki zaradcze.

Rozdział 4 przedstawia eksperymentalne prace wykonane przeze mnie i innych członków grupy POZA przy przeprojektowaniu i modernizacji zegara optycznego Sr 1 tak, aby umożliwić jednoczesne (i naprzemienne) działanie zarówno bozonowego, jak i fermionowego zegara optycznego.

Rozdział 5 przedstawia wyniki mojej pracy nad zapewnieniem pełnej sprawności fermionowego zegara optycznego w Sr 1. Zbadane zostały ładowanie fermionowych niebieskich i czerwonych pułapek magneto-optycznych. Ponadto tam, gdzie to możliwe, dokonano porównań do ich bozonowych odpowiedników.

Rozdział 6 przedstawi ocenę systematycznych przesunięć (budżet niepewności) częstości bozonowego zegara optycznego w Sr1 wykonanych w ramach międzynarodowej kampanii porównań częstotliwości w marcu 2022 r.

Załącznik A raportuje pracę (w formie opublikowanych artykułów), którą wykonałem (we współpracy z innym członkiem grupy QT) nad chłodzeniem ^{87}Rb i ^{85}Rb za pomocą grzebienia częstotliwości, a także badanie siły ciśnienia promieniowania indukowanego grzebieniem częstotliwości w gęstych chmurach atomowych.

Słowa kluczowe: zimne atomy, strontowy optyczny zegar atomowy, niebieska magiczna długość fali, fotojonizacja

Prošireni sažetak

Ova teza o optičkim atomskim satovima nije prva te vrste. Mnoge izvrsne disertacije o stroncijevim optičkim atomskim satovima i optičkim satovima općenito su već dostupne [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Opsežno sam koristio ove teze dok sam istraživao i pisao svoj doktorski rad. Nadam se da će moja vlastita teza donekle pridonijeti ovom golemom moru izvrsnih doktorskih radova i pomoći budućim mladim istraživačima kada krenu na svoje putovanje u područje optičkih atomskih satova.

Ovaj diplomski rad prvenstveno će se fokusirati na rad koji sam ja (i drugi članovi POZA grupe na Sveučilištu Nikole Kopernika) obavili tijekom mog trogodišnjeg boravka u grupi prof.hab. Michała Zawade. U ovom diplomskom radu nastojat ću jasno razlikovati svoj doprinos od doprinosu ostalih članova POZA tima. Kao dvojni doktorand, imao sam čast i zadovoljstvo biti članom dviju istraživačkih grupa. Prva grupa je Grupa za kvantne tehnologije (QT) koju vodi dr.sc. Ticijana Ban u Centru za napredne laserske tehnike (CALT) na Institutu za fiziku u Zagrebu, Hrvatska. Druga grupa je Grupa za poljski optički atomski sat (POZA) koju vodi prof. hab. Michał Zawada na Sveučilištu Nikola Kopernik u Toruńu, Poljska. Kad sam se tek pridružio POZA grupi, dva bozonska optička sata (koji će se u ovom diplomskom radu nazivati Sr 1 i Sr 2) već su bila u potpunosti operativna. Izgradnja trećeg sata, koji se trebao temeljiti na učinku superradijativnosti atoma stroncija u optičkoj rešetki plave magične valne duljine, tek je počinjala.

Ova teza biti će podijeljena u šest zasebnih poglavlja. Poglavlje 1 (koje čitatelj upravo čita) pokriva osnove optičkih atomskih satova i uvodi terminologiju koja se koristi u fizici optičkih atomskih satova kao što su točnost, stabilnost, frakcionalna stabilnost i tako dalje.

Poglavlje 2 pružit će teorijsku pozadinu koraka potrebnih za postizanje rada optičkog atomskog sata. Upoznat će čitatelja s osnovama Dopplerovog hlađenja i magneto-optičkih zamki, kao i svojstvima atoma stroncija i njegovih izotopa. Zatim će se usredotočiti na metode koje se koriste u hlađenju dvaju različitih izotopa stroncija - bozonskog ^{88}Sr i fermionskog ^{87}Sr . Zatim će se prijeći na uvod u optičke rešetke, njihove magične valne duljine i atomske polarizabilnosti satnog stanja atoma stroncija. Konačno završava visokopreciznom spektroskopijom satnog pri-

jelaza u stronciju koja se koristi za pronalaženje satnog prijelaza u optičkom atomskom satu. Nakon što je prijelaz lociran, digitalno zaključavamo naš satni laser na atomsku liniju satnog prijelaza.

Poglavlje 3 predstaviti će mjerenja fotoionizacijskih poprečnih presjeka atomskih stanja koja se koriste u ciklusu optičkog sata za ^{88}Sr . Ovi presjeci izmjereni su na novopredloženoj plavoj magičnoj valnoj duljini. Zatim će predstaviti moj vlastiti teorijski rad na proučavanju izvedivosti korištenja optičkih rešetki sa plavom magičnom valnom duljinom u optičkim atomskim satovima. Završit ću predstavljanjem mog rada na ispitivanju gubitaka atoma u magneto-optičkoj stupici izazvanih fotoionizacijom atoma u optičkoj rešetki sa plavom magičnom valnom duljinom, rezultirajućih ograničenja optičkih satova sa optičkim rešetkama sa plavom magičnom valnom duljinom i mogućih mjera za ublažavanje navedenih gubitaka.

Poglavlje 4 predstaviti će eksperimentalni rad koji sam obavio ja i drugi članovi grupe POZA na redizajnu i nadogradnji Sr 1 optičkog sata kako bi se omogućio istovremeni (i isprekidani) rad bozonskog i fermionskog optičkog sata.

Poglavlje 5 predstaviti će preliminarne rezultate mog rada na postizanju operabilnosti fermionskog optičkog sata u Sr 1. Ispitat će se spremanje atoma u plavu i crvenu fermionsku magneto-optičku stupicu. Također, gdje je to moguće, napraviti će se usporedbe sa bozonskom plavom i crvenom magneto-optičkom stupicom.

Poglavlje 6 predstaviti će procjenu sistematskih pomaka (eng. systematic shifts) satnog prijelaza za bozonski optički sat u Sr 1 kao dio naše međunarodne kampanje iz ožujka 2022.

U poglavlju 7 dan je zaključni pregled rezultata ovog doktorskog rada, kao i perspektive za daljnja istraživanja.

Dodatak A će pokazati rad (u obliku objavljenih članaka) koji sam obavio (u suradnji s drugim članovima QT grupe) na hlađenju ^{87}Rb i ^{85}Rb korištenjem frekventnog češlja, kao i ispitivanje sile zračenja inducirane frekventnim češljem u gustim atomskim oblacima.

Ključne riječi: hladni atomi, stroncij, optički atomski sat, optička rešetka, plava magična valna duljina, fotoionizacija