



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**LASEROVÁ ABLACE ATOMŮ VÁPNIKU PRO
EXPERIMENT LASEROVÉHO CHLAZENÍ ATOMŮ**

THE SPECTROSCOPY OF A CLOUD OF CALCIUM ATOMS FOR THE EXPERIMENT OF LASER COOLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Grim

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Jakub Grim**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Číp, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Laserová ablace atomů vápníku pro experiment laserového chlazení atomů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laserové chlazení atomů vyžaduje spolehlivé vynětí jednotlivých neutrálních atomů z terčiku daného prvku, jejich ionizaci a následné zachycení těchto nabitých částic v elektrické pasti. Samotné vynětí atomů z terčiku lze realizovat několika metodami, avšak jen některé metody dovolují rychlé zahájení a ukončení procesu vynětí. Ablace pomocí vysokoenergetického laserového pulsu je výhodná, neboť dovoluje vhodným nastavením parametrů laserového pulsu provést vynětí určitého počtu atomů na rozdíl od vynětí stimulovaného ohřátím terčiku daného prvku např. elektrickým proudem.

Práce je součástí běžícího projektu laserového chlazení a excitace vápníkových iontů v Paulově pasti řešeného na pracovišti Ústavu přístrojové techniky AV ČR v Brně.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce bude rozbor metod generování obláčku atomů vápníku pro experiment laserového chlazení. V rámci tématu bude proveden návrh optické a vakuové sestavy pro vytváření vápníkových atomů. Předpokládá se využití laserové ablace pomocí výkonového pulsního laseru a nasazení laserové absorpčně fluorescenční spektroskopie na vlnové délce 422 nm a detekce fotonů pomocí citlivé kamery.

Seznam doporučené literatury:

SHERIDAN, K., Photoionization of Calcium - A Comparison of Effusive Oven and Pulsed Laser Ablation, Master thesis, University of Sussex, 2009.

GUGGEMOS, M., HEINRICH, D., HERRERA-SANCHO, A., BLATT, R., ROOS, C. F., Sympathetic cooling and detection of a hot trapped ion by a cold one , New Journal of Physics, Volume 17, 103001, 2015.

KNOOP, M., MADSEN, N., THOMPSON, R. C. and all, Trapped Charged Particles - A Graduate Textbook with Problems and Solutions, World Scientific Publishing Europe Ltd, ISSN: 2059-7711, 2016.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Práce je zaměřená na výzkum metod generování atomů vápníku do iontových pastí. Zejména jde o metodu pulzní laserové ablace a o metodu generování pomocí tepelné pícky zahříváné proudem, která je v současné době využívána. Součástí práce je návrh experimentální aparatury pro generování vápníkových atomů zahrnující vakuovou a optickou sestavu a následné provedení experimentální verze podle návrhu. Na závěr je proveden experiment, kde je využito elektrického proudu k zahřívání pícky, ablačního laseru k ablaci vápníkových atomů a fluorescenční spektroskopie pro detekci generovaných neutrálních atomů vápníku.

Summary

The thesis is focused on the research on methods of generating calcium atoms into ion traps. To be specific, it is a pulse laser ablation method and generating by the calcium heat oven heated by electric current, which is currently being used. Part of the thesis is the design of experimental apparatus for the generation of calcium atoms including vacuum and optical assembly and subsequent experimental assembly itself according to design. At the end, there is an experiment, where is used electric current for heating the oven, ablation laser for ablation of calcium atoms and fluorescence spectroscopy for detection of generated neutral calcium atoms.

Klíčová slova

pulzní laserová ablace, laserové chlazení, iontová past, vápník

Keywords

pulsed laser ablation, laser cooling, ion trap, calcium

GRIM, J. *Laserová ablace atomů vápníku pro experiment laserového chlazení atomů*.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 33 s.
Vedoucí Ing. Ondřej Číp, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Ondřeje Čípa, Ph.D. Všechna odborná literatura a jiné zdroje, se kterými jsem pracoval, jsou uvedené v seznamu použité literatury. Všechny obrázky jsou ocitované, pokud nejsou mnou vytvořené.

Jakub Grim

Chtěl bych poděkovat hlavně svému vedoucímu Ing. Ondřeji Čípovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení během tvorby bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Minh Tuan Phamovi za poskytnuté konzultace a připomínky k práci. V poslední řadě i všem ostatním, kteří mi pomohli s prací, nebo mě během studia a psaní podpořovali.

Jakub Grim

Obsah

Úvod	1
1 Úvod do chlazení atomů	3
1.1 Chlazení atomů	3
1.1.1 Vápník	3
1.1.2 Dopplerovské chlazení	4
1.2 Tepelné generování částic	4
1.2.1 Vápníková píčka	4
1.2.2 Rychlost částic	6
1.3 Pulzní laserová ablace (PLA)	6
1.3.1 Výhody generování částic pomocí PLA	6
1.3.2 Princip PLA	6
1.3.3 Interakce laserového svazku s povrchem pevné látky	7
1.3.4 Zjednodušený ablační model	9
1.3.5 Ablací laser	9
1.4 Vakuum	10
1.4.1 Potřeba vakua	10
1.4.2 Vakuová technika	10
1.5 Detekční techniky ablatovaných částic	11
1.5.1 Fluorescenční spektroskopie	11
1.5.2 Hmotnostní spektroskopie	12
1.5.3 Elektronový násobič	12
2 Experimentální sestava	13
2.1 Vakuová aparatura	13
2.2 Návrh experimentální vakuové sestavy	14
2.3 Sestavování vakuové aparatury	14
2.3.1 Čištění	15
2.3.2 Montáž vakuové sestavy	15
2.3.3 Čerpání	17
2.3.4 Aktivace pícky	17
2.4 Lasery pro fluorescenční detekci a metodu PLA	17
2.5 Optická sestava	19
2.5.1 Sestava pro laserovou ablaci	19
2.5.2 Detekce fluorescence	20
3 Experiment a měření	23
3.1 Fluorescence při tepelném generování	23

3.2	Experiment laserové ablace vápníkových atomů	24
3.2.1	Vlastnosti ablačního laseru	24
3.2.2	Generování neutrálních atomů vápníků pomocí PLA	25
	Závěr	29
	Bibliografie	32
	Seznam zkratek	33

Úvod

Elektromagnetické pasti otevřely novou cestu ke studiu částic. Mezi dva typy nejvýznamnějších pastí patří Penningova a radiofrekvenční (RF) Paulova past.

První typ pasti byl pojmenován po Franzu Penningovi, který ve 30. letech minulého století experimentoval s výbojkami v magnetickém poli. Jeho práci se posléze inspiroval Hans Dehmelt, který ji poprvé sestavil v 60. letech minulého století. Za tento objev mu pak byla udělena Nobelova cena roku 1989.

V roce 1953 Wolfgang Paul popsal hmotnostní filtr založen na kvadrupólu, který je považován za předchůdce RF pasti. Tu pak navrhl v roce 1958. Paulova práce na iontové pasti byla posléze oceněna Nobelovou cenou společně s H. Dehmeltem roku 1989.

Možnost izolovat jednotlivé částice po dlouhou dobu v iontových pastech umožnila studium vlastností a spekter atomů. Největší krok v aplikacích pastí nastal ale v roce 1978, kdy bylo poprvé demonstrováno laserové chlazení zachycených iontů.

V Ústavu přístrojové techniky AV ČR (ÚPT) je využívána právě RF Paulova past, do níž jsou zachytávány vápníkové ionty, které se v současnosti generují pomocí tepelné pícky zahřívané proudem. Tato metoda má bohužel mnoho nevýhod, a proto se v současné době zkoumají jiné možnosti, jak získat a zachytit tyto částice do pasti. Jednou z možností by mohla být metoda pulzní laserové ablace (PLA), která je hlavním předmětem mé bakalářské práce.

V úvodní kapitole se zabývám nejprve motivací k využití PLA. Následně je část věnovaná teoretickému rozboru metod týkajících se generování částic do iontových pastí. Další část je věnována informacím týkajících se vakua a v závěru jsou nastíněny metody detekce částic, z nichž důležitá pro detekci v experimentu v ÚPT je metoda fluorescence.

V druhé kapitole popisují návrh experimentu zahrnující jak vakuovou, tak optickou sestavu. V poslední kapitole se zabývám samotným experimentem. Právě díky experimentování s pulzním laserem a vápníkem směřujeme k jemnému řízení procesu vystřelování částic do Paulovi pasti. Ideálním případem by pak měla být situace, kdy jsme schopni zachytit přesně definovaný počet částic v relativně krátkém čase, tj. v řádu několika málo sekund. [1]

1. Úvod do chlazení atomů

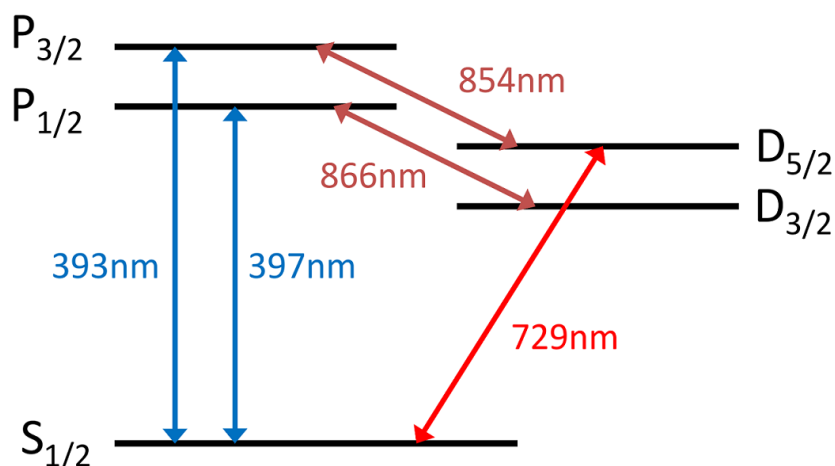
Elektromagnetické pasti společně s laserovým chlazením nám poskytují skvělý nástroj pro studium částic, už jen kvůli tomu, že je částice možné držet dlouhodobě v kontrolovatelném prostředí. Udržování částic na nízkých teplotách v řádu milikelvinů nám umožní měřit jinak těžko měřitelné vlastnosti. Častým případem měření bývá zejména absorpční spektroskopie. Zachycené a zejména laserem zchlazené částice mají obvykle velmi úzký přechod, který lze využít pro realizaci tzv. optického frekvenčního standardu. Do zmíněných pastí se zachytává řada prvků, například Al, Mg, H, Hg, Yb, Sr, Ca, případně i molekulární ionty.

1.1 Chlazení atomů

1.1.1 Vápník

V ÚPT AV ČR využíváme atomy vápníku, jejichž ionty jsou zachytávány do pasti a následně chlazeny laserem, přičemž k vlastnímu zachytávání iontů je využívána RF past tvořená tzv. kvadrupólem. Hlavním důvodem využití atomů tohoto prvku je zejména existence komerčně dostupných polovodičových laserů, jejichž vlnové délky odpovídají využívaným energiovým přechodům. Tyto přechody iontu $^{40}\text{Ca}^+$ jsou vyobrazeny na obrázku 1.1. Mezi využívané vlnové délky patří dále například 397 nm a 729 nm, které jsou vhodné k laserovému chlazení.

Atomy vápníku se však nejprve musí ionizovat, aby je bylo možné následně zachytit v elektromagnetické pasti. K ionizaci neutrálního atomu Ca se využívá dvou krokové foto-ionizace, při které se nejprve využívá $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ přechodu odpovídajícímu vlnové délce 422 nm. Tento krok způsobí přechod jednoho ze dvou valenčních elektronů atomu vápníku na vyšší kvantové číslo. Po tomto kroku následuje absorpce fotonu o větší energii, k čemuž se využívá laser s vlnovou délkou 393 nm, který způsobí další excitaci již excitovaného valenčního elektronu do oblasti tzv. přechodového kontinua, kde je již velmi slabá přitažlivost elektronu k atomovému jádru. Po těchto dvou krocích je excitovaný valenční elektron schopen opustit atom velmi pravděpodobně a z neutrálního atomu se stane kladný iont. Následkem ionizace se částice může zachytit v potenciálním poli pasti a být zchlazena.



Obrázek 1.1: Energetický diagram iontu vápníku, převzato ze stránky [2].

1.1.2 Dopplerovské chlazení

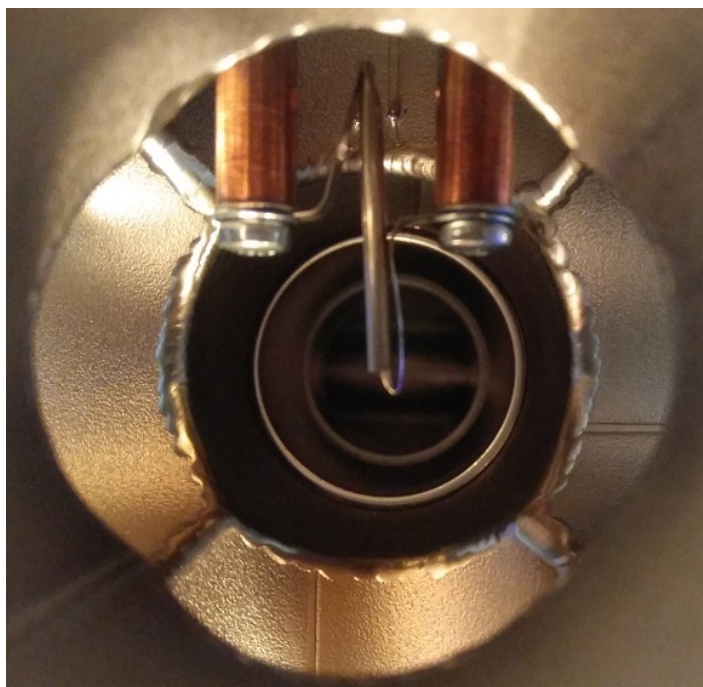
Ionty zachycené v elektrické pasti je možné efektivně chladit laserem, který využívá jevu Dopplerovského chlazení, na teplotu velmi blízkou absolutní nule. Na částice se svítí lehce podladěným laserem, tedy zářením s frekvencí o něco nižší, než je frekvence odpovídající tzv. chladicímu přechodu. Při pohybu směrem k laseru se dopplerovským jevem zvyšuje frekvence záření vůči částici. To umožní, aby částice mohla absorbovat foton a zároveň také přijmout jeho hybnost, což díky protiběžným směrům šíření způsobí iontu ztrátu hybnosti v daném směru. Následně je foton emitován náhodným směrem. Tento proces probíhá periodicky, a proto k tomuto vyzařování dochází neustále v náhodných směrech, což způsobí, že se změny hybnosti díky tomuto náhodnému vyzáření navzájem vyruší. Výsledkem neustálé absorpce a emise dojde k postupnému snižování rychlosti atomu a tedy k jeho zchlazení. K chlazení lze využít laserový svazek v každé ose trojrozměrného prostoru, což způsobí, že tento proces proběhne rychleji, neboť zachycený iont se pohybuje v elektrické pasti ve všech směrech. Průsečíku těchto svazků se říká "optický sirup", protože se zde částice pohybuje pomalu jako v husté kapalině.

V našem případě je využíváno pouze jednoho svazku, svítícího mezi dvě osy, jenž zpomalí částici v těchto dvou osách a ve třetí koná oscilační pohyb.

1.2 Tepelné generování částic

1.2.1 Vápníková píčka

Jako zdroj neutrálního atomového svazku může sloužit tepelná vápníková píčka, v současnosti implementovaná v sestavě pro experiment laserového chlazení iontů. Tento zdroj bohužel zahrnuje několik nevýhod. Hlavní nevýhodou je již samotné tepelné zahřívání, u kterého nelze příliš řídit množství vystřelených vápníkových atomů. Kvůli tepelné kapacitě píčky určitou dobu trvá, než dojde k jejímu zahřátí na požadovanou teplotu, při které již neutrální atomy mají dostatečnou energii k odpoutání se od píčky.



Obrázek 1.2: Tepelná píčka instalovaná ve vakuové komoře.

Další překážkou je setrvačnost procesu generování atomů, kdy ještě několik sekund po vypnutí přívodu proudu píčka stále vystřeluje další atomy, než se dostatečně ochladí. Tyto důvody vedou k hledání metody generování částic s mnohem přesnější kontrolou jejich množství a časovým intervalem generování. Toto je předmětem kapitoly 1.3.

Píčka je tvořena z tenké, přibližně 2 cm dlouhé nerezové trubice uzavřené vrstvou india, která chrání čistý vápník před oxidací na vzduchu, tj. před vložením píčky do vakuové komory, kde již oxidace nehrozí. Indium je vhodné, protože má nižší teplotu varu, než vápník. Díky tomu se po instalaci píčky do vakuové komory prvně zbavíme této vrstvy, než dojde k vypaření vápníku. Obrázek 1.2 zobrazuje píčku připevněnou k experimentální sestavě. K aktivaci píčky dojde pomocí série několika kroků, kdy dojde k roztavení india pomocí vysokého proudu a vytvoří se volná cesta pro vypařovaný vápník. Tím se píčka připraví pro využití v experimentu. Generování částic je pak docíleno pomocí proudu tím, že se píčka zahřeje na dostatečnou teplotu, aby mohlo dojít k vypařování atomů vápníku. Tímto získáme svazek neutrálních atomů vylétajících z píčky. Hodnotou elektrického proudu následně můžeme regulovat teplotu píčky a tím množství generovaných částic.

Rychlost odpařování částic můžeme vyjádřit pomocí jednoduché rovnice:

$$m = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \cdot p, \quad (1.1)$$

kde m je rychlost odpařování, M je molekulární hmotnost, R plynová konstanta, T je absolutní teplota a p vypařovací tlak. [3] [4]

1.2.2 Rychlost částic

Částice vápníku vylétají z pícky přibližně v rozložení úhlu 45° při teplotě mezi 500 až 700 K. Tepelná rychlost částic je definována jako $\sqrt{2k_bT/m}$. Nejpravděpodobnější rychlost částic v atomovém svazku je $\sqrt{3/2}$ násobkem tepelné rychlosti. Při teplotě 600 K můžeme spočítat tepelnou rychlost částic, která je rovna 499 ms^{-1} . Pro svazek je potom nejpravděpodobnější rychlost rovna 612 ms^{-1} , což odpovídá energii částice o hodnotě 77,7 meV.[3] [1]

1.3 Pulzní laserová ablace (PLA)

PLA je odpařování malé oblasti povrchu pevné látky pomocí vysokoenergetických laserových pulzů. PLA nachází využití v mnoha oblastech vědy v rychlé analýze prvků s téměř nedestruktivní cestou. Je možné ji aplikovat téměř na jakoukoliv pevnou látku i za atmosférického tlaku. Dalším využitím může být například i depozice tenkých vrstev nebo čištění povrchů. Kromě využití v materiálovém inženýrství se nacházejí velké výhody této metody také v medicíně pro mnoho biomedicínských aplikací. Příkladem takového využití jsou laserové skalpely nebo oční operace.

1.3.1 Výhody generování částic pomocí PLA

Jednou z možností řešení problému s malou regulační schopností generování částic tepelnou cestou by mohla být právě metoda PLA, která by nám měla poskytovat mnohem jemnější manipulaci s počtem vystřelených částic díky možnosti regulovat energii ve vystřelených pulzech. Největší výhodou se nám proto jeví to, že částice lze generovat pouze při dopadu energetického pulzu na pevnou fázi atomů. Tento proces generování částic lze regulovat nastavením energie jednotlivých pulzů, množstvím, či jejich délkou. Cílem je tak realizace metody pro velmi jemné řízení množství generovaných částic, v tomto případě, atomů vápníku.

1.3.2 Princip PLA

Laserová ablace je proces lokálního odstraňování materiálu při interakci laserového svazku s povrchem materiálu na terči v případě, že energie dopadající na plochu překoná prahovou hodnotu materiálu. Taková hodnota se typicky může pohybovat mezi $0,1 \text{ mJ/cm}^2$ až 1 mJ/cm^2 . Při slabších pulzech dochází k odpařování a sublimaci. Při silnějších může dojít k tvorbě plazmatu. Typicky se využívá energetických pulzů, ale při dostatečně výkonném laseru je možné využít i nepřetržitého laserového svazku.

Požadavky na laserový puls jsou dány mnoha koeficienty, jako je teplota vypařování, hustota materiálu, tepelná vodivost, absorpční koeficient, odrazivost, velikost spotu svazku na terči a také délka trvání pulzů. Prahová intenzita se získává nejčastěji experimentálním měřením, protože je velmi komplikované ji spočítat, už jen kvůli tomu, že je těžké zjistit všechny potřebné zmíněné koeficienty materiálu. Ale dá se spočítat hrubý odhad minimální intenzity laserového impulzu potřebného k odpaření materiálu,

který je však silnou aproximací, pomocí Moenkeho-Blankenburgovi rovnice:

$$I_{min} = \frac{\rho L_v \kappa^{1/2}}{\Delta t^{1/2}}, \quad (1.2)$$

kde ρ je hustota materiálu, který je ablatován, L_v je skupenské teplo vypařování, κ je tepelná vodivost a Δt je délka pulzů. [5] [6]

PLA nám pak poskytuje lepší metodu generování částic, kdy vysokoenergetické pulzy z ablačního laseru dopadají na povrch materiálu a vysoce zahřejí oblast okolo místa dopadu. Vystřelené částice je dále možno kolimovat do atomového svazku pomocí jednoduchého kolimátoru tvořeného z přepážky s malým otvorem (apertury) pro formování svazku. Terčíkem, který budeme k testování metody PLA využívat, nám může opět sloužit vápnicková pícka. Energie k ablaci je dodávána mnohem kratšími pulzy, než jaká je doba k tepelnému přenosu v materiálu, což umožňuje zahřát jen velmi malou oblast terčíku na velmi vysoké teploty a díky tomu získáme částice pouze z této malé oblasti, což vede k tvorbě tzv. ablačních kráterů, lišících se svým tvarem dle délky pulzu. Názorná ukázka různých kráterů je uvedena na obrázku 1.4. To požaduje nasazení velmi krátkých pulzů, díky čemuž je možno překročit ablační limit a odstranit část materiálu. Délky pulzů pak můžeme mít v rozsahu mikrosekund až po pulzy femtosekundové. Využívá se k tomu celá řada laserů, v našem případě však bude využito Nd:YAG laseru a délka takových pulzů generovaných tímto laserem je pak typicky 10 ns. Maximální množství takto odpáleného materiálu, který se může odpařit pomocí pulzu, lze vypočítat pomocí:

$$M = \frac{E(1 - R)}{C_p(T_b - T_0) + L_v}, \quad (1.3)$$

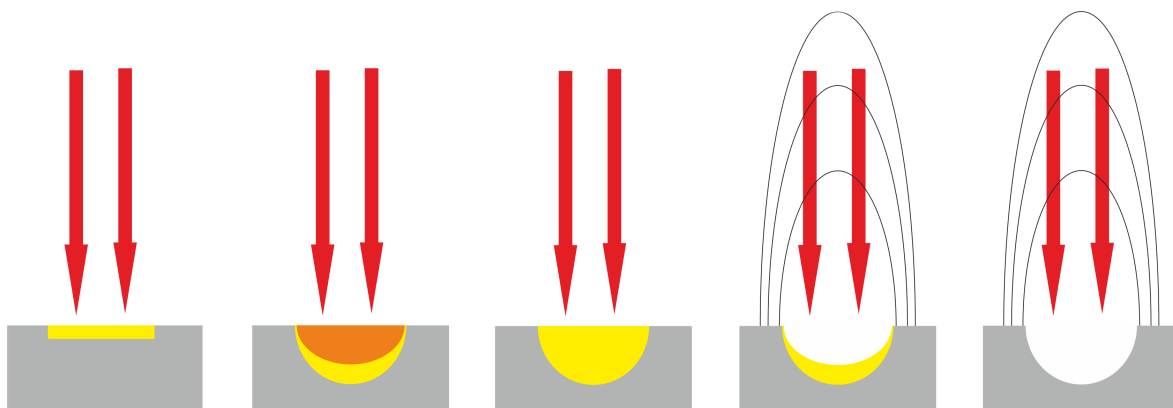
kde E je energie pulzů, R je odrazivost povrchu materiálu, C_p je tepelná kapacita, T_b teplota varu, T_0 teplota okolí a L_v je skupenské teplo vypařování. [3] [5]

Proces PLA se dá rozdělit na několik fází, které během ablace proběhnou. Prvně dojde k absorpci energie na povrchu volnými elektrony, následně k tepelnému přenosu hlouběji do materiálu v řádu desítek nanometrů až mikrometrů, a konečně k roztavení této oblasti. Pak dojde k varu a následnému vypařování a nakonec k odlítnutí uvolněných částic a plazmy. Velmi zjednodušené schématické znázornění celého procesu je uvedeno na obrázku 1.3

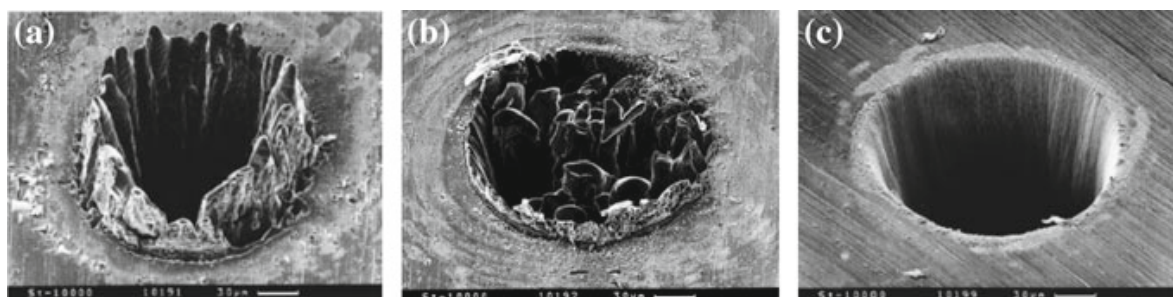
1.3.3 Interakce laserového svazku s povrchem pevné látky

Dopadající laserové záření na povrch je z části absorbováno a z části odraženo. Při překročení ablačního prahu dojde k ohřevu vzorku až k teplotě varu a k fázovým změnám. U hodnot blízkých ablačnímu prahu, avšak nižších, může docházet k tepelnému poškození materiálu, ale ne k samotné ablaci. Při dopadu fotonů na povrch materiálu volné elektrony ve vodivostním pásu absorbují energii a ta je dále přenášena do hloubky typicky několika nanometrů až mikrometrů skrze srážky mezi elektrony. Zároveň dochází vlivem vysokoenergetického svazku i k ionizaci části zasažených částic.

Absorpční proces je mnohem kratší než doba šíření tepla, což vede k odpařování



Obrázek 1.3: Postupně zleva můžeme vidět všechny fáze: absorpce energie, vedení tepla, tání, odpařování, expanze (vystřelení) částic.



Obrázek 1.4: Krátery o průměru 100 μm vytvořené do oceli, a) nanosekundové pulzy, b) pikosekundové pulzy, c) femtosekundové pulzy. Převzato z [7].

malé oblasti a může vést až k formování plazmy vlivem vysokých energií svazku. Teplota na povrchu je pak určena množstvím absorbované energie a tepelnou vodivostí ablatovaného materiálu. Podle délky pulzů pak můžeme rozlišit nejčastěji využívané nanosekundové a femtosekundové pulzy (využívají se však i mikrosekundové a pikosekundové), které se svým procesem trochu liší kvůli samotné době procesu. Například využití fs pulzů narozdíl od ns nám poskytuje vyšší teplotu a tlak vlivem dopadu záření. A neprobíhají žádné sekundární interakce mezi svazkem laseru a oblakem částic, který má po odpaření velkou kinetickou energii. Největší rozdíl můžeme ale pozorovat na snímcích kráterů, které se dle délky pulzu velmi liší (čím kratší pulz, tím hladší kráter), které jsou vyobrazeny na obrázku 1.4. [6] [7]

Při využití pulsů za kombinace vysokého výkonu laseru a krátkého trvání jednotlivých pulsů se pod povrchem dosáhne teploty varu dříve než na povrchu terče. Následkem toho se pod povrchem zvětšuje tlak, čímž vzniká v hlubší vrstvě superkritický stav a dochází k přehřátí materiálu. Následně se částice vlivem tlaku pod povrchem uvolní "explozí" a oblak částic je vystřelen z povrchu terče pryč. Důsledkem toho vzniká tzv. ablační kráter. Směs takto odpálených částic je tvořena z části ionty, a z části neutrálními atomy, při velkých energiích se množství plazmy zvětšuje. Rozptyl oblaku takto odpálených částic od povrchu materiálu by se dal popsat pomocí tvaru elipsoidu. [8] [7]

1.3.4 Zjednodušený ablační model

Kompletní teoretický popis PLA je velmi rozsáhlý a komplikovaný, proto se hledá i zjednodušení. Pro nanosekundové pulzy, se kterými budeme pracovat, je dominantní tepelná vodivost, tání, vypařování a tvoření plazmy.

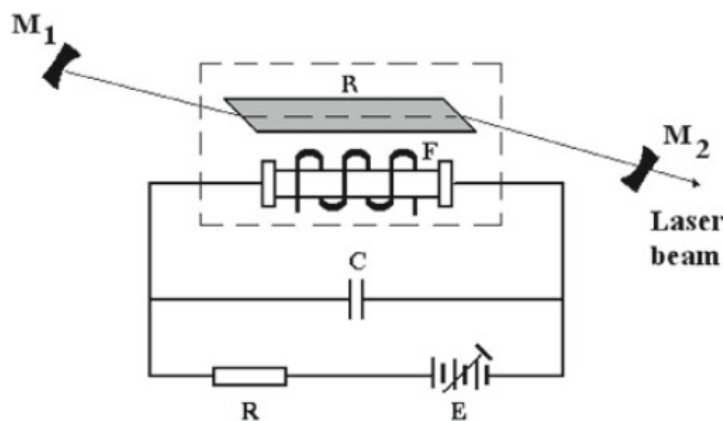
Pro jednodušší představu se může pracovat s tím, že veškerá energie laseru povede k roztavení materiálu. Když se vezme, že materiál absorboval 100 % energie a zanedbá se tepelná vodivost a přehřátí ablatovaných par, může se množství hmoty odstřelené z materiálu popsat pomocí vztahu:

$$m = \frac{N \cdot E_{pulse}}{c_p \cdot (T_V - T_0) + \Delta H_m + \Delta H_v} \quad (1.4)$$

kde N je počet pulzů, E_{pulse} energie jednotlivých pulzů, c_p tepelná kapacita, T_V teplota vypařování, T_0 původní teplota, ΔH_m entalpie tání a ΔH_v entalpie odpařování. [9]

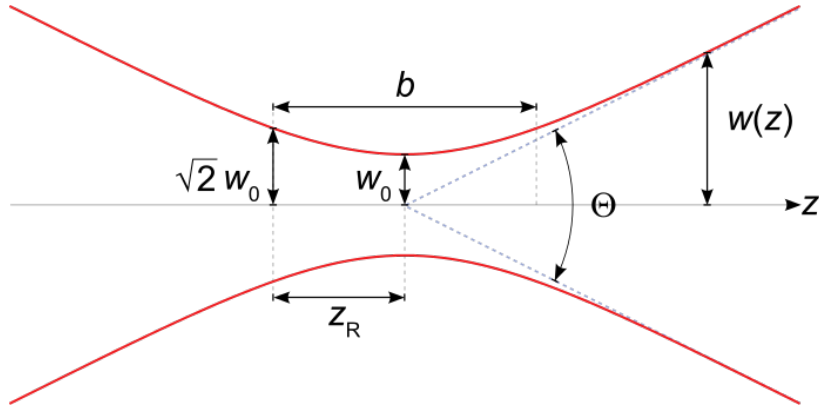
1.3.5 Ablací laser

Zdrojem ablačních pulzů pro PLA vápničku bude Nd:YAG laser s vlnovou délkou 1064 nm. Možná délka pulzů je nastavitelná ve velkém rozpětí, ale typicky se pracuje s nanosekundovými pulzy. Při ablací využijeme 20 ns dlouhé pulzy. Jejich energie může dosahovat až 850 mJ a celkový výkon laseru může dosáhnout až 6,5 W při vlnové délce 1064 nm. Emitování může probíhat po jednotlivých pulzech, nebo s neustálým opakováním s opakovací frekvencí 10 Hz. Šířka výstupního svazku laseru je 8 mm a divergence svazku je menší než 0,7 mrad. Tento laser se řadí do třídy 4, tedy s možností nebezpečné reflexe. Může způsobit velké škody na zdraví, a proto vyžaduje extrémní opatrnost při práci. [10]



Obrázek 1.5: Schématické znázornění Nd:YAG laseru, převzato z [7].

Svazek je fokusován pomocí spojné čočky na píčku. Tento svazek ablačního laseru je třeba považovat za Gaussovský svazek, schématicky znázorněný na obrázku 1.6. Vyobrazený průběh nám udává, že svazek není fokusován do jediného bodu, ale v závislosti na vlastnostech svazku a čočky, udává jeho nejmenší poloměr, který je možné vypočítat



Obrázek 1.6: Schématické znázornění Gaussovského svazku, převzato z [11].

pomocí rovnice:

$$2w_0 = \frac{4\lambda f}{\pi d}, \quad (1.5)$$

kde w_0 nám představuje poloměr svazku v ohniskové vzdálenosti, λ vlnovou délku záření, f ohniskovou vzdálenost čočky a d průměr svazku před vstupem do čočky. [3]

1.4 Vakuum

Vakuum se obecně rozumí jakýkoli tlak, který je nižší než normální atmosférický tlak. Dále takto můžeme různé druhy vakua dělit na několik podkategorií, které jsou roze-psány v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1: Dělení vakua

Atmosférický tlak	$1,013 \cdot 10^5$	Pa
Nízké vakuum	$1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^3$	Pa
Střední vakuum	$3 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^{-1}$	Pa
Vysoké vakuum	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-7}$	Pa
Ultra vysoké vakuum	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-10}$	Pa
Extrémně vysoké vakuum	$< 1 \cdot 10^{-10}$	Pa

1.4.1 Potřeba vakua

Provádění experimentu s ablací za přítomnosti vysokého vakua má důležité výhody. Zejména jde o snížení interakce mezi atomy vápníku s jinými částicemi. Další výhodou je zamezení oxidace čistého vápníku v píce. V komoře je také třeba udržovat nízký tlak pro neměnné podmínky pro experiment.

1.4.2 Vakuová technika

Vakuová technika zahrnuje pevné součásti nezbytné k udržování potřebného tlaku, které jsou vyrobeny nejčastěji z nerezové oceli. Ke spojení součástí se využívá různých druhů

přírub, které jsou standardizované jako CF, KF, nebo ISO. K nepropustnosti spojů mezi vakuovými díly se používají těsnění, která pro požadavek vysokého stupně vakua bývají provedena z mědi. Dalšími součástmi vakuové techniky jsou například okna a průchodky. Také sem řadíme vývěvy pro čerpání vakua a měrky k měření jeho tlaku.

Prvním krokem k dosažení vysokého vakua je nejdůležitější mít dokonale čisté a odplyněné součásti, které budou ve vakuu, aby nedocházelo k zaplyňování komory a zhoršování tlaku. Dále je nutné využít vhodných vakuových komponentů. K dosažení vysokého vakua je nutné použít systém CF, který dovoluje použití měděných těsnění. Nezbytná je řádná montáž a rovnoměrné dotažení všech spojů, aby do komory nevnikal atmosférický vzduch přes netěsnosti. To lze ověřit pomocí hélia tzv. leak testem, neboť hélium snadno proniká netěsnostmi a při nízkém tlaku v komoře se zaznamenává možné zvýšení tlaku na měrce.

Pro čerpání atmosférického tlaku se využívá pouze jedna vývěva, když stačí dosáhnout nižšího stupně vakua. Pro dosažení vysokého vakua se používá několik vývěv v sérii. V takovém případě je využito vývěvy čerpající proti atmosféře. Příkladem takové vývěvy může být rotační vývěva. K té je sériově připojena vývěva, která nezvládne čerpat proti atmosférickému tlaku, ale je schopna dosáhnout mnohem nižšího tlaku. Zde je příkladem turbomolekulární vývěva. V poslední řadě lze do komory zapojit iontovou vývěvu (v našem případě je důležitá k udržení tlaku při zanášení komory částicemi vápníku). Součástí komory je také důležitá vakuová měrka, kterých také existuje celá řada, kde každá pracuje v jiném rozmezí tlaků.

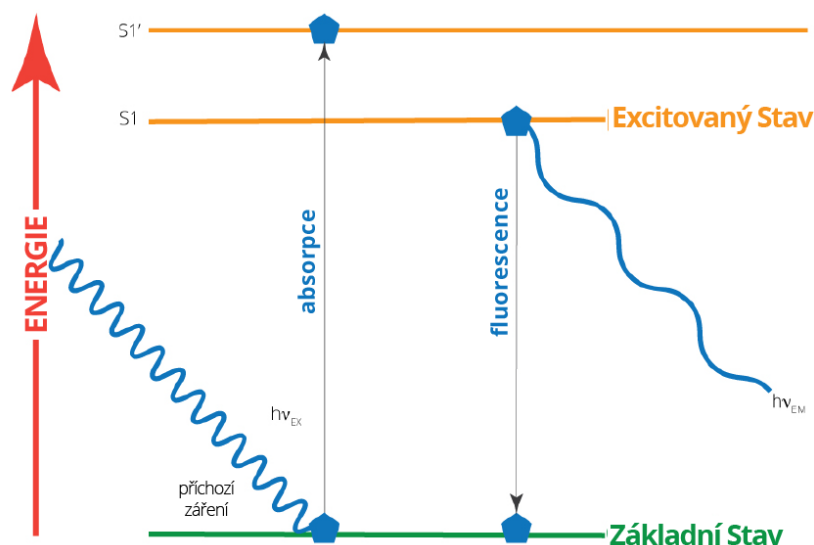
S každou vývěvou se lze dostat na určitou hodnotu tlaku, pod kterou se už nedá dostat čerpáním. To znamená, že množství částic čerpaných z komory je rovno počtu částic, které se do komory dostávají odpařováním zbytkových nečistot z vakuových dílů. Tuto hodnotu lze ještě snížit dále pomocí procesu tzv. vypékání, kdy se komora zahřeje na vysokou teplotu, nečistoty získají vyšší kinetickou energii a dojde k odskočení od stěn komponent a tedy ke zvýšení tlaku vakua. V této situaci se vývěvě zase zvyšuje účinnost čerpání, neboť není na limitním tlaku, ovšem jen do té doby, dokud tlak neklesne na původní (tedy limitní) hodnotu. Tento tlak je však po navrácení k původní teplotě komory a vakuových komponent mnohem nižší.

Při návrhu vakuové komory je důležité využívat co největších průřezů potrubí, nejmenšího počtu pravoúhlých kolen a co nejkratší vzdálenosti od vakuové komory k čerpací aparatuře. Vše toto ovlivňuje rychlost čerpání. S každým kolenem prudce klesá rychlost čerpání, dále místo s nejmenší vodivostí (jak dobře prochází objem plynů za jednotku času) nám udává výslednou vodivost.

1.5 Detekční techniky ablatovaných částic

1.5.1 Fluorescenční spektroskopie

Fluorescence je sekundární jev, u kterého dochází k vyzáření energie z atomu ve velmi krátké době po excitaci, tedy atomu který energii pohltí. Fluorescenční metody nacházejí využití v mnoha oblastech, jako může být medicína (např. testování životnosti buněk), analytická chemie (např. prvková analýza) ad.



Obrázek 1.7: Schématické znázornění průběhu fluorescenčního jevu, převzato ze stránek [13].

K excitaci atomů vápníku se využívá světlo s krátkou vlnovou délkou, blízkou UV záření, k čemuž se využije v našem případě laser s vlnovou délkou 422 nm. Jde o první stupeň foto-ionizačního procesu popsaného v kapitole 1.1.1. Po excitaci se atom může vrátit do základního stavu, a při tom dojde k vyzáření energie ve formě fotonu, který má o něco nižší frekvenci, viz obrázek 1.7. Detekční kamerou můžeme detekovat tyto fotony a jejichž počet se za určitý časový interval popisuje jako intenzita záření. Následně lze vytvořit graf závislosti intenzity záření na optické frekvenci excitačního laseru a zjistit například izotopové složení vzorku a množství poměr těchto izotopů. [12]

1.5.2 Hmotnostní spektroskopie

Hmotnostní spektroskopie je hojně využívaná metoda hlavně v analytické chemii. Jde o metodu, která využívá rozdělení měřených částic podle poměru m/Q , kdy je nejdříve částice nutné ionizovat a následně jsou odděleny v elektromagnetickém poli od sebe, dle poměru m/Q . Ty jsou následně zachycovány detektorem a vytváří se hmotnostní spektrum měřených částic. Díky tomuto spektru lze identifikovat neznámé částice, či izotopové složení měřených částic.

1.5.3 Elektronový násobič

Jedná se o detektor (příkladem může být tzv. channeltron) detekující ionty, který pracuje na procesu sekundární emise elektronů. Ionty se urychlují pomocí vysokého napětí do těla detektoru, kde při srážce se stěnou zařízení dojde k emisi elektronu, který je následně dále urychlován. Cestou dochází k dalším srážkám se stěnami a emitují se další elektrony. Tento proces takto pokračuje, dokud elektrony nedorazí ke koncové části detektoru, kde se měří výsledný proud způsobený těmito elektrony pomocí elektronického detektoru.

2. Experimentální sestava

V této kapitole se zabývám návrhem vakuové sestavy pro ablaci vápníkových atomů. K tomuto experimentu jsem navrhl optickou sestavu potřebnou k ablaci vápníku a k samotné detekci generovaných částic. Dále následuje popis realizace experimentu dle výsledného návrhu. Tato část práce zahrnuje montáž vakuové komory a její vyčerpání. V poslední části je popsána experimentální práce na sestavení optických tras na optickém stole, které jsou nezbytné pro realizaci vlastní metody PLA a optické části pro detekci fluorescence.

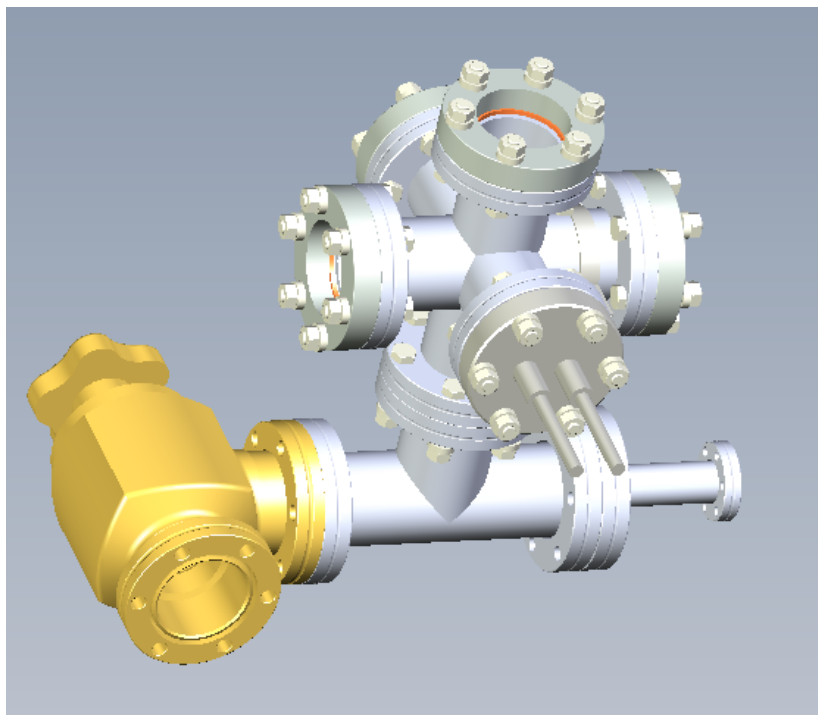
2.1 Vakuová aparatura

Pro získání vysokého vakua bylo nezbytné sestavení vakuové aparatury. K provedení experimentu jsem navrhl jednoduchou vakuovou komoru, která dovoluje dostatečnou viditelnost vápníkové pícky z různých stran, ať už kvůli průchodu svazků laserů, detekování kamerou, nebo aby bylo možné experiment sledovat nezávisle na kamerové detekci. Důležitou částí bylo uchycení pícky tak, abychom na ni mohli zaměřit svazek pulzního laseru, nebo do ní přivést elektrický proud.

Hlavní část navržené komory, ve které se odehrává experiment, je tvořena šesti-ramenným křížem. Z komory vede elektrická průchodka, na kterou je připevněna pícka. Na spodní část je dále napojen T-kus vedoucí jednak k hlavnímu ventilu spojující komoru s turbomolekulární vývěvou, a jednak k iontové vývěvě, která kromě trvalého čerpání zbytkového vakua dovoluje současně měřit tlak v komoře (fungující pod nižším tlakem než 10^{-3} mbar). Důležitými komponentami jsou vakuová okénka, přes které procházejí jednotlivé laserové svazky či fluorescenční záření. Bylo nutné využít antireflexních vrstev na těchto okénkách tak, aby nedocházelo ke ztrátám výkonu laseru kvůli zpětnému odrazu. Tato okna vyplňují otvory ve zbývajících ramenech vakuového kříže. Jedno okno je povrstveno s antireflexní vrstvou na vlnovou délku 1064 nm, kterým prochází ablační laser kolmo na povrch pícky. Ta je uchycena na elektrickou průchodku na protější straně, která slouží zároveň pro přívod elektrického proudu k pícce. Ve zbytku ramen kříže jsou umístěna další 3 okénka s antireflexní vrstvou na vlnovou délku 422 nm, která slouží k průchodu detekčního laseru a k samotné detekci fluorescence z obláčku generovaných vápníkových atomů.

2.2 Návrh experimentální vakuové sestavy

V programu Autodesk Inventor jsem nejprve provedl návrh sestavy, kde jsem využil komerčně dostupných součástí z nabídky firmy Vacom. Dbal jsem na zachování co nejmenšího objemu komory a využití co nejméně součástí pro napojení komory na kombinovanou vývěvu. Schématické uspořádání návrhu experimentální vakuové sestavy je vyobrazeno na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Návrh komory v programu Autodesk Inventor 2015, sestaveno z komerčních vakuových dílů firmy Vacom.

Všechny spoje vakuových komponent jsou řešeny spojením typu CF (viz sekce 2.3.2) s měděným těsněním, kde byla snaha všude zachovat největší průměr potrubí pro zajištění rychlého čerpání atmosférického tlaku. Většinou byly využity spoje průměru CF40. Jediný menší průměr spoje je k iontové vývěvě, kde bylo využito redukce z CF40 na CF16.

2.3 Sestavování vakuové aparatury

Cílem sestavení experimentální vakuové aparatury je připravit prostředí pro provádění testů PLA, které bude obdobné komoře pro laserové chlazení iontů vápníku v laboratoři ÚPT. Vzhledem k tomu, že v této experimentální komoře se nepředpokládá zachytávání iontů, cílem je dosažení residuálního tlaku v řádu 10^{-6} mbar.

2.3.1 Čištění

Důležitým krokem k dosažení předpokládaného stupně vakua je zajištění dokonalé čistoty všech komponent před montáží experimentální vakuové aparatury. Čistoty všech vakuových komponent se docílí několika krokovou čistící procedurou. Využívá se demineralizovaná voda a chemických roztoků na bázi detergentů a alkoholů. Detergenty zajistí prvotní vyčištění od nečistot. Díky alkoholům se lze zbavit mastnoty a biologických nečistot. Pro zlepšení kontaktu s čistící látkou se využívá ultrazvukové myčky. Při jednoduchém čištění lze využít mechanického čištění pomocí čistých hadříků. Posledním krokem je využití stlačeného dusíku pro odstranění všech prachových částic.

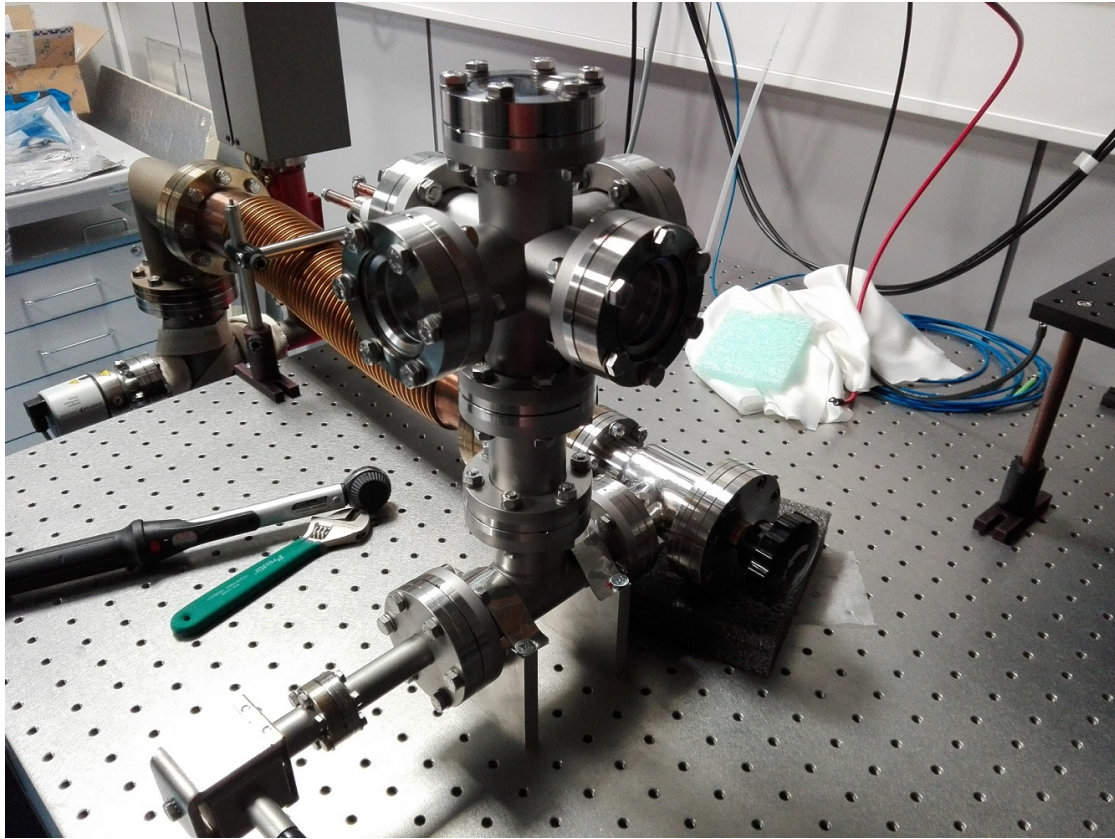
Jak jsem již zmínil úvodem této kapitoly, pro naši aparaturu nebylo nezbytně nutné dosáhnout ultra vysokého vakua a využít všech kroků čištění tak, jak by to bylo pro případ sestavy pro laserové chlazení iontů. Čištění proběhlo pouze mechanické s alkoholem, po kterém následovalo využití stlačeného dusíku. Antireflexní okna byla mechanicky očištěna pouze na kovových částech, na skla bylo využito pouze dusíku, aby nedošlo k poškození antireflexních vrstev. Šrouby podstoupily celou čistící proceduru kvůli nečistotám z výroby (zejména mastnoty a biologické nečistoty), aby nedocházelo k reziduálnímu znečištění vakuové komory.

2.3.2 Montáž vakuové sestavy

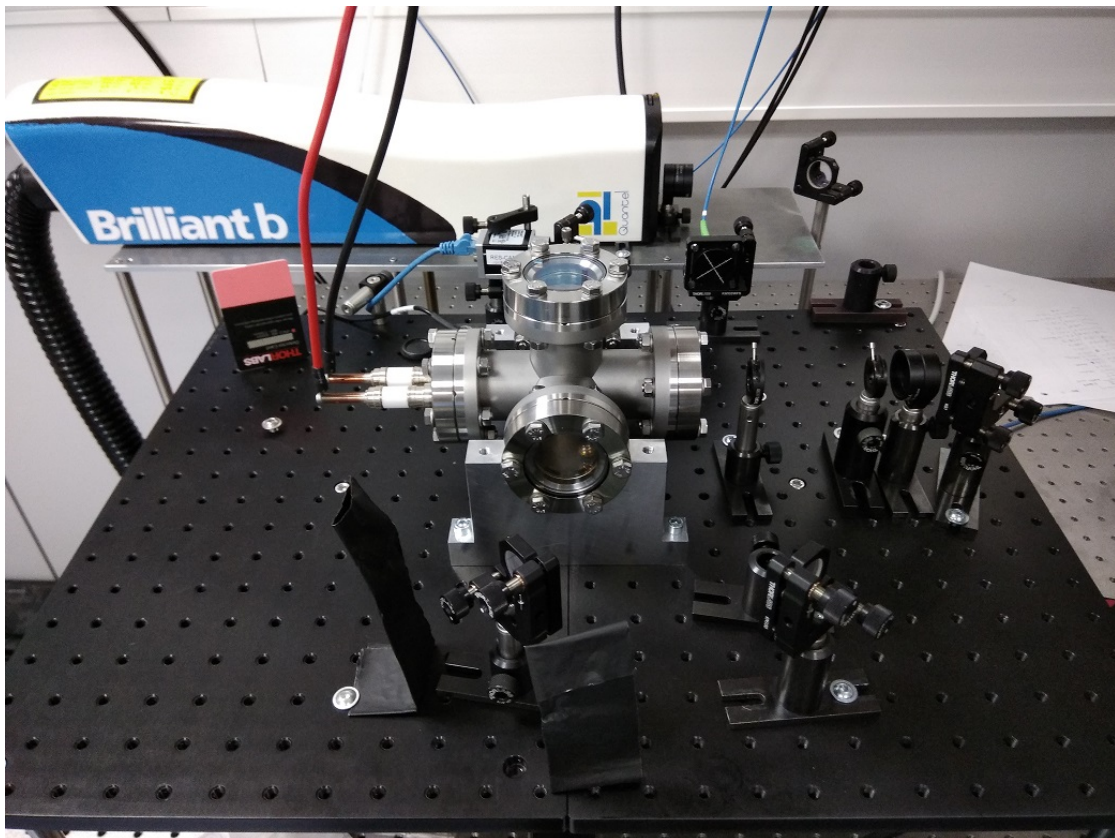
Všechny díly sestavy byly zvoleny typu CF. Jak bylo již dříve uvedeno v kap. 1.4, ty se vyznačují tím, že jako těsnění nevyužívají gumových kroužků, ale měděných, do kterých se nože přírub komponent zalisují pod velkým tlakem. To umožní dosáhnout mnohem nižších tlaků, neboť zde nevznikají mikropóry jako v případě KF spojů s gumovými kroužky. Další předností oproti gumovému těsnění je možnost zahřívání na vyšší teploty, takže lze komoru vypékat na vysoké teploty, při kterých gumové těsnění selhává. Příruby jsou k sobě stlačovány řadou šroubů, které musejí být utahovány rovnoměrně, aby došlo k dokonalému zaříznutí těsnění do kroužku bez vytvoření netěsností. Každý šroub může být utahován pouze do určitého momentu, aby nedošlo k deformaci šroubů. Toho lze dosáhnout pomocí momentového klíče s nastavitelným maximálním momentem síly.

Uchycení komory ke stolu bylo vyřešeno jednoduchými držáky ve tvaru "U", do kterých je komora uložena. Nejdůležitější součástí komory je ventil, který nám umožňuje odpojení vývěvy od vakuové komory po dokončení čerpání, jakmile dojde k jeho důkladnému zavření. Po montáži komory byla kolem ní upevněna optická deska vyrobená na míru dle rozměrů vakuové komory. Tato deska je důležitá k práci s optickou aparaturou, jejíž laserové a detekční svazky musejí být vedeny ve výši vakuových okének.

Po proběhlé montáži byly pořízeny snímky sestavy. Na obrázku 2.2 je pohled na realizovanou experimentální vakuovou aparaturu a na obrázku 2.3 je aparatura doplněná o optický stůl se sestavenými optickými trasami.



Obrázek 2.2: Sestavená experimentální vakuová komora.



Obrázek 2.3: Experimentální vakuová aparatura doplněná o optickou sestavu pro vedení laserových svazků a detekci fluorescence ablatovaných atomů vápníku.

2.3.3 Čerpání

K čerpání bylo využito turbomolekulární vývěvy, se kterou se snadno dosáhne tlaku v řádu 10^{-7} až 10^{-8} mbar. Dále byly využity topné pásy k zahřátí celé sestavy za účelem uvolnění částic na stěnách komory, aby nedocházelo k zaplyňování komory a zvýšení tlaku. Dalším důvodem zahřívání je, že se tlak v komoře začne zvedat díky uvolňujícím se nečistotám ze stěn komory, a tudíž je čerpání díky vyššímu tlaku mnohem efektivnější. Po vychladnutí komory nám pak zůstane nižší tlak, než před tímto procesem. K udržení nízkého tlaku je pak využívána iontová vývěva, která zároveň slouží i k měření tlaku.

Při čerpání bylo využito turbomolekulární vývěvy po dobu dvou týdnů. Následovalo vyhřívání pomocí topných pásů na krátkou dobu, a v poslední řadě byla uvedena do provozu iontová vývěva, která zároveň měří zbytkový tlak prostřednictvím iontového proudu. Po vyčerpání komory bylo ještě nutné provést tzv. leak test pro zjištění netěsností v komoře prováděného pomocí heliového hledáčku. Nebyly však nalezeny žádné netěsnosti, takže bylo možné konstatovat bezvadné dodržení montážního postupu.

Se zapnutou turbomolekulární a iontovou vývěvou bylo dosaženo nejnižšího tlaku $2,3 \cdot 10^{-8}$ mbar a po uzavření hlavního ventilu od kombinované vývěvy tlak po určité době stoupl na $1,1 \cdot 10^{-7}$ mbar. Nakonec se však po dlouhé době tlak ustálil na mnohem vyšší hodnotě $3 \cdot 10^{-6}$ mbar, což bylo způsobeno nejspíše nedostatečným vyčištěním komory, nebo netěsností, která nebyla nalezena.

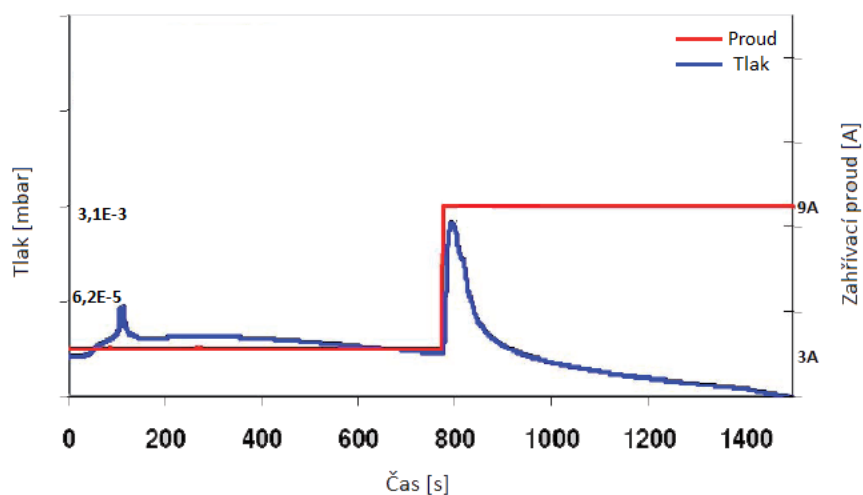
2.3.4 Aktivace pícky

Po sestavní vakuové komory a jejím vyčerpání bylo přistoupeno k aktivaci vápníkové pícky. Aktivací pícky se rozumí odpaření vrstvy india, která chrání vápník v pevné fázi před oxidací v atmosféře. Aktivace pícky proběhla jejím zahřátím na vysokou teplotu pomocí protékajícího proudu 3 A po dobu 5 minut. Při tomto procesu dochází ke krátkodobému zhoršení tlaku, neboť odpařující se atomy india zvyšují tlak v komoře. Po odpálení této vrstvy pak argonová atmosféra, chránící vápník při skladování, postupně unikala pryč, což jsme mohli sledovat zvýšením tlaku. V dalším kroku aktivace pícky bylo ještě třeba nastavení vyššího elektrického proudu protékajícího píckou v rozmezí 8-14 A, což způsobilo další zhoršení tlaku. Průběh změn tlaku je znázorněn na obrázku 2.4. [14]

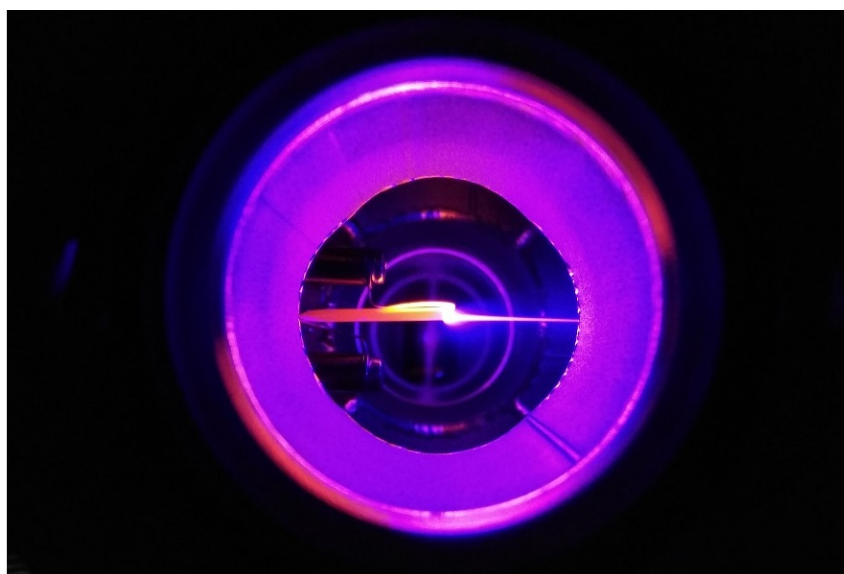
2.4 Lasery pro fluorescenční detekci a metodu PLA

K detekci emitovaných atomů nám slouží polovodičový laser pracující na vlnové délce 422 nm. Ten využívá $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ přechodu vápníku odpovídající optické frekvenci 709 078 394,3 MHz, na kterou je třeba tento laser naladit. Pomocí tohoto laseru se vyvolá absorpce oblačkem neutrálních atomů vápníku s následnou fluorescencí, která pak identifikuje přítomnost těchto atomů. Jedná se o polovodičový laser, který je k aparatuře přiveden pomocí optického vlákna. K detekci je využito laseru o výkonu přibližně 300 μ W.

Druhým laserem je pulzní Nd:YAG laser pracující na vlnové délce 1064 nm s nastavi-



Obrázek 2.4: Průběh tlaku při odpálení pícky, převzato z [14].



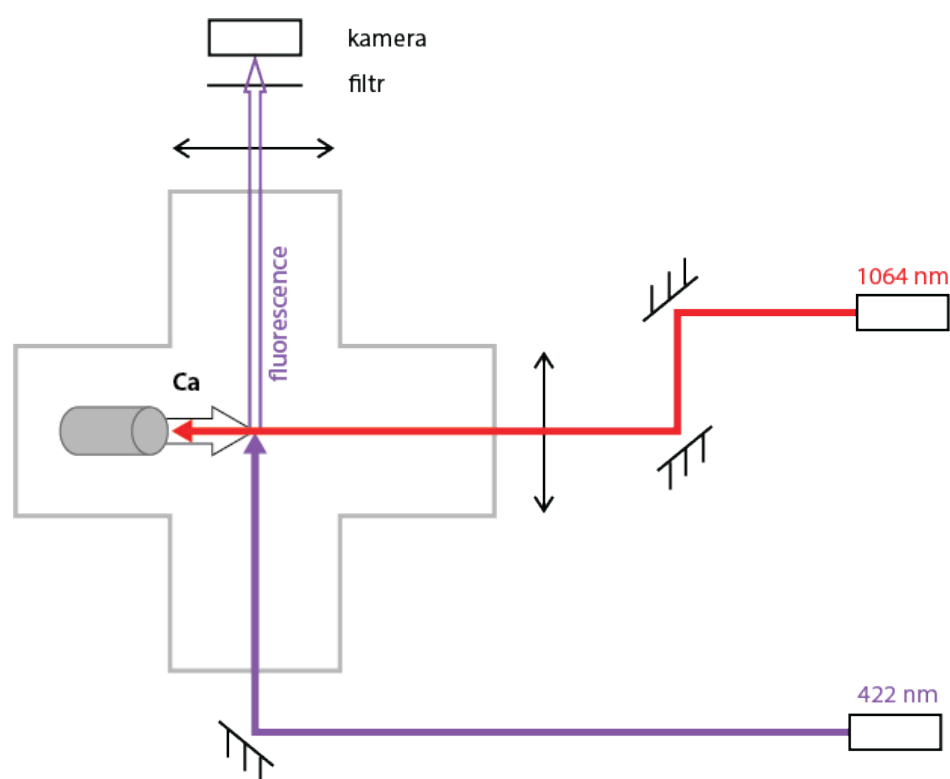
Obrázek 2.5: Tepelná pícka po odpálení generující atomy při proudu 8A.

telnými parametry, jako je délka pulzu, nebo nastavitelný čas, který ovlivňuje samotný výkon laseru.

Po aktivaci pícky, zmíněné v kap. 2.3.4, a následným jejím zahříváním pomocí elektrického proudu, jsme zahájili generování svazku neutrálních atomů letících z pícky. Již při proudu vyšším než 4 A bylo možno okem sledovat slabý svazek ozářených atomů fluorescenčním laserem 422 nm. Intenzita fluorescence se zvětšovala úměrně se zvyšováním proudu a následným zahříváním pícky. Na obrázku 2.5 můžeme pozorovat aktivní pícku s ozářenými částicemi pomocí laseru 422 nm.

2.5 Optická sestava

Optická sestava musí vyhovět několika požadavkům, mezi které patří zejména možnost přesné manipulace se svazky a přivedení ablačního a detekčního fluorescenčního laseru k pícce. Nutné je i zajištění detekce fluorescence kamerou. Optická sestava se tedy skládá ze dvou částí, první pro ablační laser a druhá pro detekci fluorescence.



Obrázek 2.6: Schématické znázornění optické sestavy s lasery a vápníkovou píckou, společně i se sestavou pro detekci fluorescence.

Na obrázku 2.6 můžeme vidět znázornění celé sestavy s ablačním laserem, který nakláníme a posouváme pomocí dvou zrcátek tak, abychom jej mohli přesně zaměřit na střed pícky. Dále se před vstupem do komory nachází čočka, kterou se svazek vhodně fokusuje do malé oblasti na vápníkové pícce, což umožňuje využít menšího výkonu laseru a odstřelení menšího množství vápníkových atomů.

2.5.1 Sestava pro laserovou ablaci

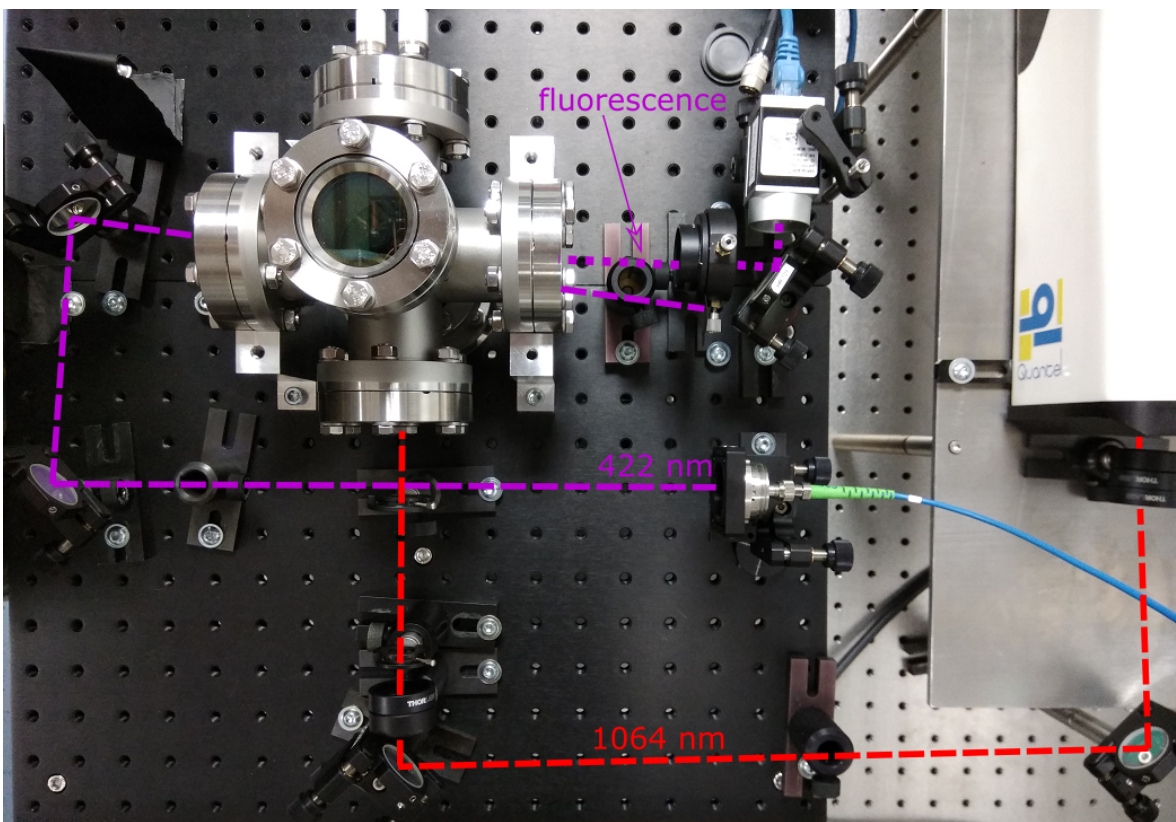
V trase ablačního svazku se nacházejí 2 zrcadla pro přesnou manipulaci se svazkem. Ta jsou speciálně povrstvena pro odraz vlnové délky 1064 nm pod úhlem dopadu 45°. Dále je v trase umístěna vhodná spojná čočka pro regulaci průměru svazku na vápníkové pícce. Tuto čočku je nutné umístit až za zrcátka, aby vlivem zúžení svazku a zvýšené hustoty energie nedošlo k poškození zrcadel. Ablací laser míří přímo do pícky v její ose vyzařování ablatovaných atomů.

2.5.2 Detekce fluorescence

V cestě pro excitační svazek laseru 422 nm nám stačí jedno zrcadlo sloužící k náklonu svazku do oblasti, kde se očekává obláček vystřelených vápníkových atomů. V této trase není třeba žádné čočky na regulaci průměru svazku, protože částice vylétají ve velkém oblaku a není třeba excitační svazek zužovat. K rozšíření průměru svazku laseru 422 nm, a tudíž osvětlení většího prostoru obláčku, se čočka nehodí z důvodu slabého výkonu laseru, který máme k dispozici. Tento svazek míří v komoře přibližně kolmo na cestu ablačního laseru, kde je slabý náklon vůči kolmému směru, aby se svazek vyhnul čočce za komorou, která slouží ke sběru. K experimentu je přiveden laser 422 nm optickým vláknem a zkolimován pomocí kolimátoru.

K měření fluorescence je využito detekční kamery, která je také určena pro měření např. závislosti počtu ablatovaných neutrálních atomů vápníku na výkonu ablačního laseru. Jedná se o kameru značky Basler. Ozářené atomy vápníku emitují světlo všemi směry, a proto je třeba použít fokusační čočku, která nasměruje alespoň část světla do kamery. Ta je následně ovládána pomocí softwaru, kterým se dá nastavit expoziční čas, citlivost a počet snímků za vteřinu. Tato kamera má citlivost pouhých 40 % své maximální hodnoty na požadovanou vlnovou délku 422 nm. V cestě pro kameru je proto využít speciální optický filtr povrstvený reflexní vrstvou zaručující vysokou odrazivost vlnových délek v okolí fluorescenční vlnové délky blízké 422 nm. Vlnová délka 422 nm má však zde velmi malou odrazivost a projde skrz filtr na kameru. Například při zkoušce kamery s tepelným generováním nám zahřátá pícka přesvítí veškeré ozářené částice a nelze zjistit, zda detekujeme částice.

Na obrázku 2.6 můžeme vidět výsledný návrh optické trasy. Na obrázku 2.7 je vidět hotová optická sestavu připravená k provedení experimentu společně se znázorněnými trasami svazků.



Obrázek 2.7: Vyznačené trasy laserových svazků na optickém stole a detekce fluorescence.

3. Experiment a měření

V této kapitole je využito sestavené aparatury k provedení plánovaných experimentů s generováním neutrálních atomů vápníku pomocí metody PLA. K tomu je využito ablačního laseru, pícky a detekčního laseru 422 nm, který nám excituje vystřelené atomy z pícky, z nichž vyvolaná fluorescence je následně sledována na citlivé kameře.

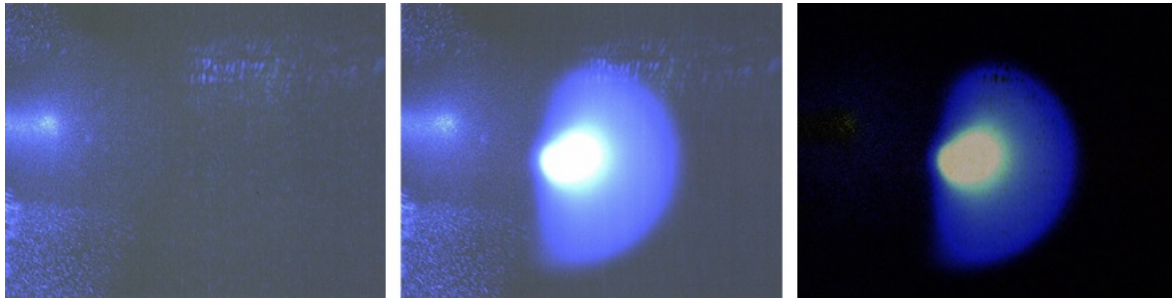
Mezi plánované experimenty patří zejména proměření závislosti detekce fluorescence na elektrickém proudu procházejícím píckou, kdy se nám generují vápníkové neutrální atomy v závislosti na teplotě pícky. Dalším krokem je seznámení se s vlastnostmi ablačního laseru a závislosti jeho výkonu na nastavených parametrech. Finální částí experimentu je sledování generace částic při dopadu laserových pulzů na pícku, tj. ověření metody PLA na experimentální sestavě.

3.1 Fluorescence při tepelném generování

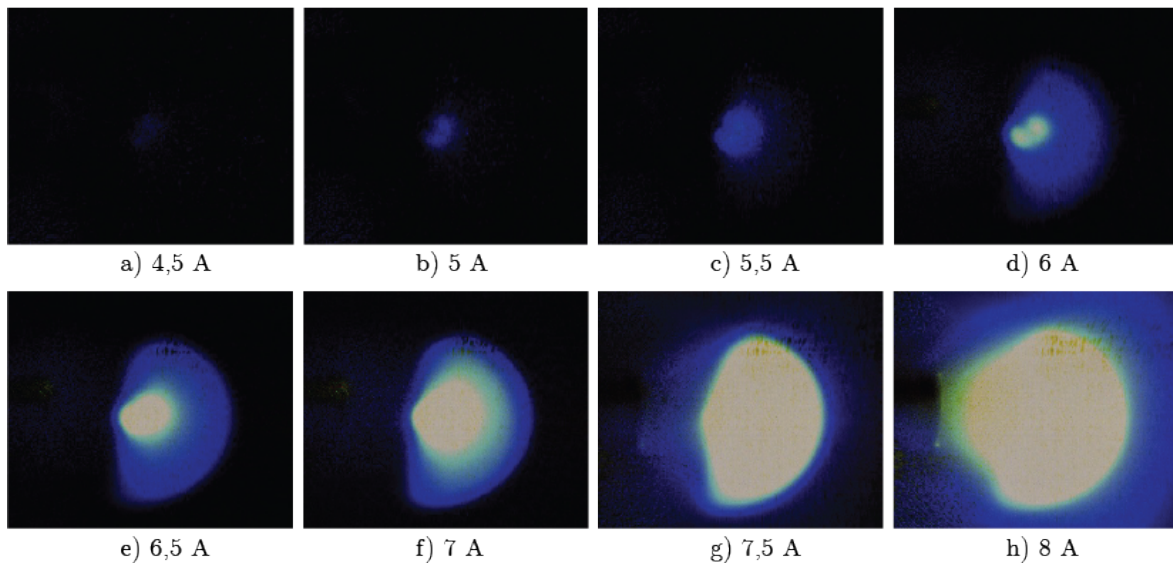
Prvním plánovaným experimentem je sledování fluorescence na kameře při tepelném generování částic. Ta probíhá při interakci fotonů detekčního laseru 422 nm s vylétajícími vápníkovými atomy z pícky, který se z ní vypařuje. Pícka se postupně zahřívá elektrickým proudem od 4 A do 8 A. Při překročení elektrického proudu 4 A začala být viditelná fluorescence na generovaných atomech.

K detekci byla využita citlivá kamera s nastaveným expozičním časem 500 ms a citlivostí na maximum. Při samotné detekci bylo na kameře nežádoucí pozadí obsahující mnoho šumu a reflektovaného světla z detekčního laseru od vakuové komory. Následkem toho bylo nutné vyřešit, jak se zbavit nežádoucího pozadí. Toho jsem docílil pomocí vlastního programu v programovacím prostředí MATLAB, kdy jsem zprůměroval více pořízených snímků. Vytvořil jsem snímek bez fluorescence a následně snímek s fluorescencí. Tyto snímky jsem rozložil do matic, které se od sebe odečetly a z výsledné matice jsem vygeneroval konečný snímek. Pro bližší představu jsou na obrázku 3.1 postupně uvedeny obrázky, se kterými jsem pracoval k získání výsledného snímku.

Po detekování fluorescence kamerou a následném zpracování obrazu prostřednictvím mého programu v prostředí MATLAB jsme získali sekvenci snímků zobrazujících průběh fluorescence při zahřívání pícky. Tato sekvence je vyobrazena na obrázku 3.2. V prostředí MATLAB lze pomocí rozložení těchto obrázků na matice získat relativní hodnoty intenzity fluorescence. Aby z nich bylo možné dostat reálné hodnoty, bylo třeba nakalibrovat údaje z kamery. K tomu jsme využili záření o známém výkonu. Bylo využito nízkointenzitního laserového svazku, jehož výkon byl snížen pomocí šedého filtru s útlumem 30 dB. Tento svazek měl světelný výkon 454 nW, který jsem změřil přesně



Obrázek 3.1: Obrázek nalevo je nežádoucí záření na kameře, uprostřed je průběh detekce fluorescence i s pozadím, napravo je výsledný obrázek s potlačeným pozadím.



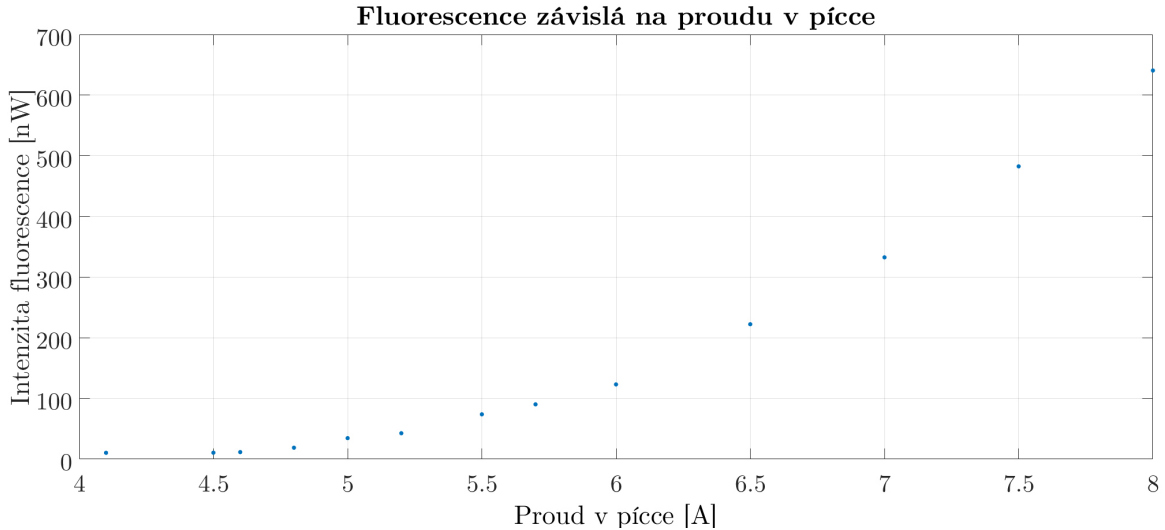
Obrázek 3.2: Průběh fluorescence při zahřívání píčky pro různé hodnoty elektrického proudu protékajícího píčkou.

pomocí světelného výkonoměru. Díky kalibraci bylo možné snímky převést na reálné hodnoty zářivosti a vynést je do grafu. Tento graf je uveden na obrázku 3.3.

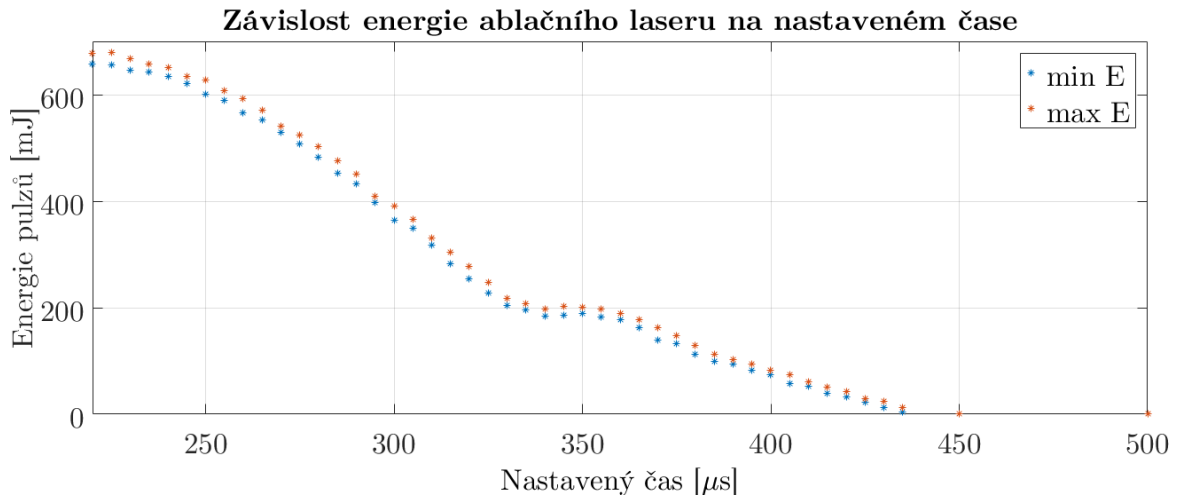
3.2 Experiment laserové ablace vápníkových atomů

3.2.1 Vlastnosti ablačního laseru

K ablaci s pulzním laserem bylo prvně důležité zjistit, o jakých energiích a výkonech se generují laserové pulzy při různém nastavení laseru. Pro laser lze nastavit čas závěrky pro regulaci výkonu a energie v rozmezí od 220 μs do 500 μs . S klesající hodnotou času stoupá výkon laseru. Dále lze nastavit délku pulzu. Laser lze ovládat po jednotlivých pulzech, nebo s opakovací frekvencí 10 Hz. Energie v pulzu je na výkonu závislá s periodou pulzů, tedy na 0,1 s, nikoli na délce jejich trvání. To znamená, že náš laser má i při slabém výkonu velmi silné energie pulzů. Zároveň pulzy fungují spolehlivě až při čase 430 μs a nižším. Obrázek 3.4 ukazuje proměřené hodnoty energií laserových pulzů v závislosti na nastaveném čase. Lze si všimnout, že ve všech nastavených časech výkon laseru kolísá v intervalech o velikosti přibližně 20 mJ.



Obrázek 3.3: Naměřená intenzita fluorescence v závislosti na elektrickém proudu protékajícím píčkou.



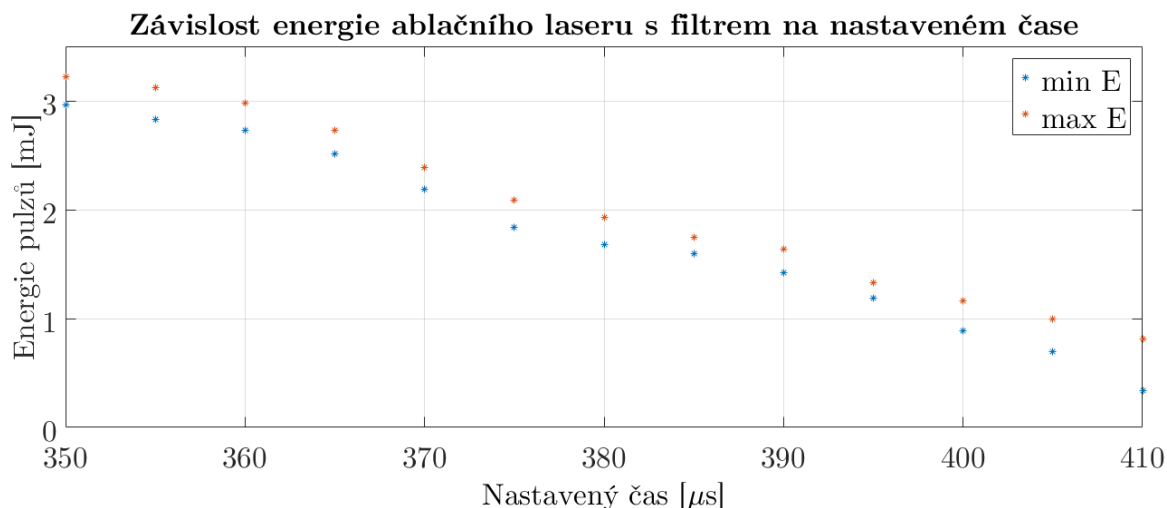
Obrázek 3.4: Naměřené energie laseru při různém nastavení času.

Z hlediska optického výkonu toto kolísání odpovídá přibližně 200 mW.

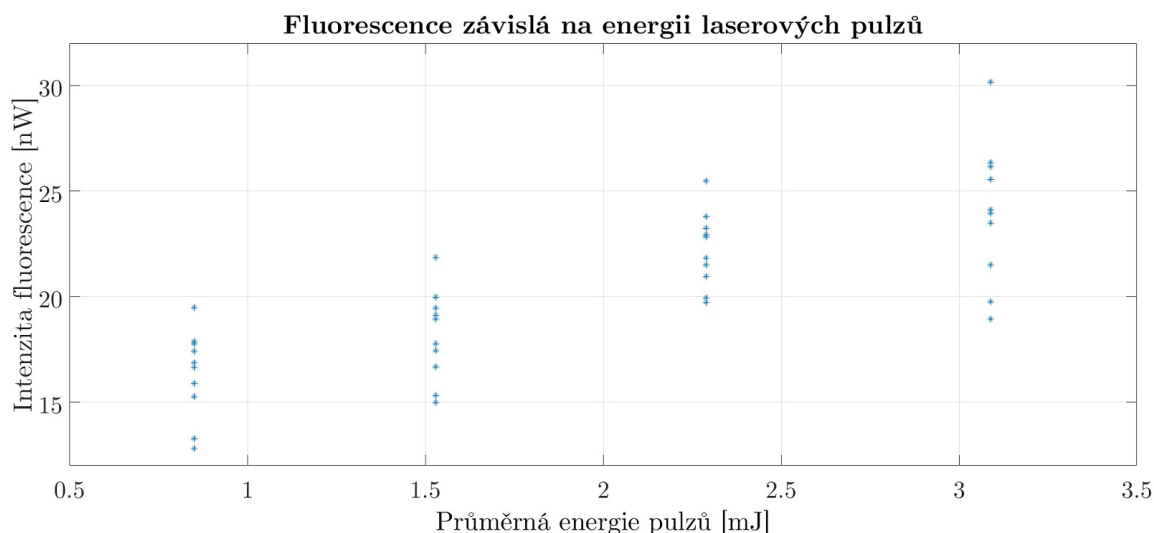
Z důvodů velmi silných energií bylo třeba využít šedého filtru s atenuací 24 dB na zredukování energie pulzů. Po instalaci šedého filtru bylo nezbytné naměřit novou orientační tabulku závislosti energií na době otevření závěrky. Tentokrát byla závislost naměřena pouze pro nastavení času závěrky, ve kterých se bude pohybovat energie potřebná pro testování PLA. Tento orientační graf je zaznamenán na obrázku 3.5.

3.2.2 Generování neutrálních atomů vápníků pomocí PLA

Ke generování neutrálních atomů vápníku bylo využito zmíněného pulzního laseru, pracujícího na vlnové délce 1064 nm. Ten nám umožnil generovat částice pouze v krátkých okamžicích při dopadech pulzů. To ovšem ztížilo samotnou detekci fluorescence, protože k ní docházelo pouze desetkrát za vteřinu a kamera nesnímala přesné okamžiky, kdy docházelo k ablaci. Kvůli tomu bylo při detekci pořízeno více snímků při každém měření



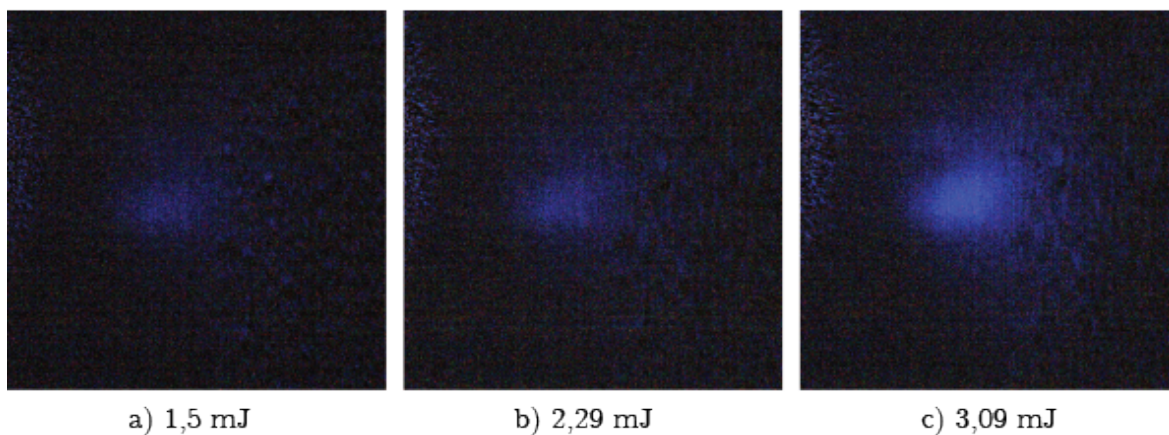
Obrázek 3.5: Naměřené energie laserových pulzů s průchodem přes šedý filtr při různém nastavení času záklopky.



Obrázek 3.6: Průběh intenzity fluorescence při změně nastavení energie pulzního laseru v metodě PLA.

a všechny byly zpracovány v prostředí MATLAB stejným způsobem, jako v případě měření s generováním pomocí tepelné píčky. Výsledné hodnoty lze vidět na obrázku 3.6.

Můžeme si všimnout velkého kolísání hodnot intenzity fluorescence při každém nastavení energie v laserovém pulzu. To je způsobeno tím, že kamera nebyla schopná snímat přesné okamžiky ablace, nebo rozdílnými hodnotami energií v jednotlivých pulzech. Ke generování částic většinou začalo docházet při nastaveném čase 410 μs , kdy byla energie v pulzu dostatečně vysoká. Kromě viditelné fluorescence na kameře se ablace projevovala zábleskem v komoře, když došlo k odstřelení vápníkových atomů. K častějším zábleskům začalo docházet při kratším čase než 400 μs . Při čase 370 μs k ablaci docházelo již neustále. Generování vápníku metodou PLA bylo docíleno jak sekvencí pulzů, tak i samostatnými pulzy. Výsledné obrázky obláčku ablatovaných váp-



Obrázek 3.7: Detekce fluorescence při ablací při snímání obrazu po dobu 5 sekund. Levý obrázek je s průměrnou energií pulzů 1,5 mJ, prostřední 2,29 mJ, pravý 3,09 mJ.

níkových atomů získané pomocí fluorescenčního zobrazení a kamerovým snímáním jsou na obrázku 3.7.

Závěr

V první kapitole byly rozebrány metody generování obláček vápníku pro experiment laserového chlazení. Mezi ně patří generování neutrálních atomů vápníku pomocí tepelné pícky, která je zahřívána protékajícím proudem. Druhou metodou je využití pulzní laserové ablace (PLA) pomocí silného pulzního laseru, která nabízí několik výhod oproti předešlé metodě. Tepelné generování je nevhodné ve chvíli, kdy je nutné proces okamžitě ukončit, nebo zahájit. PLA lze oproti tomu využít v přesně dané okamžiky. Dále byla rozebrána teorie potřebná pro optimální nastavení parametrů experimentální sestavy. Šlo zejména o informace k vakuové technice a k detekci generovaných vápníkových atomů pomocí fluorescenční spektroskopie.

Druhá kapitola se zabývala návrhem optické a vakuové aparatury ke generování vápníkových atomů. Vakuová aparatura byla navržena v programu Autodesk Inventor s požadavky na co nejmenší objem vakuové komory pro rychlé vyčerpání. Následně byla aparatura sestavena dle návrhu. Optická sestava byla potřebná k trasování svazků laserů a k detekci fluorescence vápníkových atomů. Součástí je trasa pulzního laseru 1064 nm, který byl přiveden na zdroj vápníkových atomů a detekční trasa obsahující detekční laser 422 nm, který umožnil detekci vystřelených neutrálních atomů vápníku, a trasu pro detekci fluorescence a ke sběru dat na kameře.

V poslední kapitole jsou popsány provedené experimenty s generováním vápníkových atomů. Bylo zkoumáno tepelné generování a vliv elektrického proudu protékajícího píckou na detekci intenzity fluorescence na citlivé kameře. Detekční laser odpovídající $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ přechodu v atomu vápníku ozařoval oblast před píckou a mířil kolmo na směr vylétajícího vápníku. Snímky z kamery byly následně zpracovány v programovacím prostředí MATLAB, bylo třeba odečíst nežádoucí šum z kamery a obrázky převést na číselné údaje. Dále byla kamera nakalibrována pomocí záření o známém světelném výkonu pro převedení číselných údajů na intenzitu fluorescence. Po zpracování dat byl sledován exponenciální nárůst množství detekovaných částic při zvyšování teploty pícky zvyšující se hodnotou elektrického proudu. Dále bylo třeba nastavit a změřit výkon a energii pulzů pulzního laseru. V posledním experimentu byla pozorována ablace atomů vápníku způsobena laserovými pulzy a ověření funkčnosti generování metodou PLA.

V provedené práci jsem tak demonstroval funkčnost metody PLA, která může být nyní rozvíjena již přímo ve vakuové komoře v laboratoři ÚPT, kde probíhá laserové chlazení vápníkových iontů.

Bibliografie

- [1] THOMPSON, Richard; MADSEN, Niels; KNOOP, Martina. *Trapped charged particles: a graduate textbook with problems and solutions*. New Jersey: World Scientific Publishing Europe Ltd., [2016]. ISBN 978-178-6340-115.
- [2] *Ca Level Scheme*. Dostupné také z: <https://quantumoptics.at/en/10-projects/41-sqip.html>.
- [3] SHERIDAN, Kevin. *Photoionization of Calcium: A Comparison of Effusive Oven and Pulsed Laser Ablation*. Brighton, 2009. Diplomová práce. University of Sussex.
- [4] PILLING, Norman B. Vapor Pressure of Metallic Calcium. *Physical Review*. 1921, **18**(5), 362–368. ISSN 0031-899x.
- [5] CREMERS, David A.; RADZIEMSKI, Leon J. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2006. ISBN 9781119971122.
- [6] SCHNEIDER, Christof W.; LIPPERT, Thomas. Laser Ablation and Thin Film Deposition. *Laser Processing of Materials*. 2010, **139**, 89–112. ISBN 978-3-642-13280-3.
- [7] STAFE, Mihai; MARCU, Aurelian; PUSCAS, Niculae N. *Pulsed Laser Ablation of Solids Basics, Theory and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-364-2409-783.
- [8] BULGAKOVA, N.M.; BULGAKOV, A.V. Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization to phase explosion. *Appl Phys A*. 2001, **73**(2), 199–208. ISSN 0947-8396.
- [9] LEITZ, Karl-Heinz; REDLINGSHÖFER, Benjamin; REG, Yvonne et al. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Physics Procedia*. 2011, **12**, 230–238. ISSN 18753892.
- [10] QUANTEL. *Brilliant / BrilliantB instruction manual*. 2008.
- [11] *Gaussian beam*. Dostupné také z: <https://physics.stackexchange.com/questions/345218/gaussian-beam-refraction>.
- [12] *1. Principy fluorescenční spektroskopie*. Dostupné také z: <http://psych.lf1.cuni.cz/fluorescence/soubory/principy.htm>.
- [13] *Fluorescence*. Dostupné také z: <https://www.wpiinc.com/blog/2017/06/27/article/ca-sup-2-sup-detection-in-muscle-tissue-using-fluorescence-spectroscopy/>.

- [14] *ALVASOURCES®* - *ALVATEC*. Dostupné také z: <https://www.yumpu.com/en/document/view/1493046/alvasourcesr-alvatec>.

Seznam zkratek

- PLA** Pulzní Laserová Ablace
RF Radiofrekvenční
ÚPT Ústav přístrojové techniky AV ČR