

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta
Katedra Fyziky povrchů a plazmatu

Optimalizace impulsního silnoproudého výboje v plynu plněné kapiláře pro aplikační účely - Ar^{8+} laser 46.9 nm

Disertační práce v oboru
Fyzika plazmatu a ionizovaných prostředí

RNDr. Jaroslav Štraus
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Školitel: RNDr. Karel Koláček, CSc.
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

Praha 2018

Poděkování

Děkuji mému školiteli RNDr. Karlu Koláčkovi, CSc. za mimořádné odhodlání, se kterým mě přes můj pokročilý věk přiměl k zahájení Ph.D. studia a za vynikající pracovní podmínky, které mi přitom vytvářel. Velmi si vážím jeho mimořádně ochoty, se kterou mi často pomáhal s libovolnými pracemi v libovolnou denní i noční dobu.

Děkuji paní Prof. RNDr. Janě Šafránkové, DrSc. za mimořádně laskavou všestrannou a milou pomoc.

Děkuji celému kolektivu pedagogů Katedry fyziky povrchů a plazmatu Matematicko-fyzikální fakulty UK v čele s prof. RNDr. Zdeňkem Němečkem, DrSc. za velmi vlídné a přátelské prostředí ke studiu a také za úžasné velkorysý přístup.

Mým kolegům z ÚFP AVČR, v.v.i. děkuji za inspirující atmosféru a za nejrůznější pomoc a podporu, které se mi dostávalo, kdykoli to bylo potřeba. Zejména děkuji Ing. Jiřímu Ullschmiedovi, CSc., který díky všestranné erudici dokázal přesně odhadnout, co je pro moji práci důležité, a byl mi spolehlivou oporou. Antonínu Baumrukovi děkuji za perfektní konstrukční práce na vývoji aparatury a jejich doplňků, Zdeňku Kopeckému děkuji za nezdolný optimismus a důvtip, podpořený bohatými praktickými zkušenostmi, se kterým pomáhal se vším, co bylo momentálně potřeba.

Děkuji kolegům teoretikům RNDr. Pavlu Vrbovi, CSc. a Ing. Jakubu Hübnerovi, Ph.D., kteří mi na základě matematického modelování umožnili hlouběji porozumět fyzikální podstatě pozorovaných jevů.

Ing. Milanu Řípovi, CSc. děkuji za přečtení a vylepšení mé práce důkladnými připomínkami a před časem také za uvedení nejen do tématu, ale hlavně do společenství sportovně zaměřených kolegů.

Mému nejbližšímu kolegovi, Mgr. Jiřímu Schmidtovi, Ph.D. děkuji za vynikající souhru při hledání a odstraňování příčin nejrůznějších problémů a za aktivní, tvůrčí a efektivní přístup ke společné práci. Bez jeho spolupráce by předkládaná práce patrně nevznikla.

Děkuji také svým blízkým, že mi pomáhali, jak mohli, zejména manželce, která měla pochopení pro mé pozdní příchody a o víkendech mi vytvářela příznivé podmínky pro psaní.

Abstrakt

Předmětem práce bylo dokončení vývoje české varianty extrémně ultrafialového (XUV) argonového kapilárního laseru pracujícího na vlnové délce 46.9 nm a jeho přizpůsobení pro první praktické aplikace.

Víceoborový komplex vzájemně provázaných problémů byl analyzován a studován: S pomocí defektoskopických metod byly zjišťovány příčiny nízké životnosti kapiláry, spektroskopicky byl na fyzikálním modelu studován vliv režimu předionizace. Provedením nezbytných konstrukčních a technologických změn a multi parametrickou optimalizací pracovního režimu byly zjištěné nedostatky potlačeny.

XUV laser byl fokusován do stopy o velikosti cca 100 μm a aparatura byla rozšířena o praktické pomůcky a doplňky pro speciální aplikace, zejména pro expozici vzorků při extrémních teplotách.

Z praktických aplikací XUV laseru byla provedena měření odrazivosti multivrstevných zrcadel a pohltivosti tenkých kovových filtrů. Principiálně byly ověřeny možnosti naprašování tenkých vrstev a testování radiační odolnosti materiálů s pomocí XUV laseru. Byla změřena patrně první teplotní závislost rychlosti XUV laserové ablace, v intervalu teplot od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, na BaF_2 .

Abstract in English

The aim of the thesis was to complete the development of the Czech version of the extremal ultraviolet (XUV) argon capillary laser working at the wavelength 46.9 nm and its adaptation for the first practical applications.

A multi-discipline complex of mutually interconnected problems was analyzed and studied: The reasons for a capillary low life-time were investigated using defectoscopic methods, a pre-pulse regime influence was studied with the help of spectroscopy on a physical model. By performing necessary construction and technology changes as well as by the multi-parametric optimisation of working regime, the indicated weaknesses were suppressed.

The XUV laser was focused into a footprint of the size about 100 μm and the apparatus was extended by a set of practical aids and accessories for special applications, especially for exposition of the samples at extreme temperatures.

As practical applications of the XUV laser, measurements of multilayer mirror reflectivity and filter transmissivity were performed. Using the XUV laser for a thin layer deposition and radiation resistance testing was verified to be practicable in principle. Probably a first temperature dependence of an XUV laser ablation rate was measured, in the temperature range from -180 deg.C to $+200\text{ deg.C}$, on BaF_2 .

OBSAH

1. Úvod.....	6
1.1. Lasery obecně	6
1.2. První XUV lasery	6
1.3. Roccův stolní XUV laser 46.9 nm.....	7
1.4. První aplikace Roccova laseru.....	8
1.5. Česká varianta Roccova laseru CAPEX a cíle mé práce.....	8
2. Aparatura CAPEX.....	10
2.1. Použité fyzikální principy.....	10
2.1.1. Zjednodušený obecný princip konvenčních laserů	10
2.1.2. Specifika plazmatických XUV laserů	10
2.2. Princip Roccova laseru využitý u aparatury CAPEX.....	11
2.3. Blokové schéma a funkce aparatury CAPEX.....	13
2.4. Počáteční varianty aparatury CAPEX v době před prokázáním laserování	14
2.5. Spektroskopické prokázání laserování	14
3. Optimalizace aparatury CAPEX	14
3.1. Schéma optimalizace	14
3.2. Defektoskopie - předčasná destrukce kapiláry	17
3.2.1. Struska na vnitřní stěně kapiláry	17
3.2.2. Podélné praskliny ve stěně kapiláry	18
3.2.3. Doporučená opatření	19
3.3. Technologie – hledání efektivnější koncepce výroby kapiláry	20
3.3.1. Původní stav - celokeramická kapilára.....	20
3.3.2. Mezistupeň – kombinovaná kapilára z keramiky a PMMA.....	21
3.3.3. Nová koncepce – keramika zalitá do polyuretanu	21
3.4. Konstrukce – problematické napojení kapiláry.....	24
3.4.1. Původní stav – zemní elektroda, clonka a axiální těsnění.....	25
3.4.2. Optimalizovaná sdružená zemní elektroda a radiální těsnění	26
3.5. Režim generace laserujícího plazmatu - předionizace a proud hlavního výboje.....	28
3.5.1. Původní režim a jeho slabiny	28
3.5.2. Spektroskopické studium efektu předionizace.....	28
3.5.3. Multiparametrická optimalizace energie XUV laseru CAPEX.....	31
3.5.4. Optimalizovaný režim	32
3.5.5. Srovnání s literaturou	34
3.5.6. Možnosti ovlivňování profilu laserového svazku	36
3.6. Výsledné technické parametry laseru CAPEX.....	38

3.7.	Shrnutí optimalizace	38
4.	Diagnostické a aplikační pomůcky a přístroje	40
4.1.	Interaktivní systém pro interpretaci atomových spekter	40
4.2.	Zaměřovací viditelný laser	40
4.3.	Variabilní luminiscenční stínítko	41
4.4.	Metoda "šikmého pozorování" neviditelných stop běžným mikroskopem	41
4.5.	Zlatý ablační detektor	42
4.6.	Průchozí vakuová XUV fotodioda	43
4.7.	Přípravek pro měření XUV směrové odrazivosti	44
4.8.	XUV Interferometr pro ekvidistanční nanostruktury	45
4.9.	Elektrické manipulátorky do vakua	47
4.10.	Teplotně nastavitelné uchycení vzorku	48
4.10.1.	Kryostat do -190 °C	48
4.10.2.	Termostat do 400 °C	49
4.11.	Shrnutí pomůcek	50
5.	Aplikace laseru CAPEX.....	51
5.1.	Přímé nanostrukturování povrchu PMMA	51
5.2.	Ovlivňování magnetických vlastností tenkých vrstev	52
5.3.	Pozorování optických efektů - "plumů" během ablace.....	53
5.4.	Depozice tenkých vrstev.....	54
5.5.	Testování radiační odolnosti materiálů XUV ablací	54
5.6.	Teplotní závislost rychlosti XUV ablace BaF ₂	55
5.7.	XUV Metrologie.....	56
5.7.1.	Měření odrazivosti zrcadel pro XUV oblast	56
5.7.2.	Měření propustnosti Al filtrů pro XUV oblast.....	58
5.8.	Shrnutí aplikací.....	60
6.	Závěr.....	61
7.	Literatura.....	62
8.	Patentová literatura	64
9.	Přílohy - Vlastní publikace	65

1. Úvod

V souvislosti s tématem předkládané disertační práce vzniklo 9 publikací, na kterých jsem se spolupodílel, a které k práci přikládám jako číslované přílohy **P1** až **P9**. V hlavním textu jsem se tak mohl zaměřit výhradně jen na ty partie, které i s odstupem času považuji za pozoruhodné, přičemž pro obsažnější informace lze snadno do příslušné přílohy nahlédnout.

1.1. Lasery obecně

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, neboli LASER představuje kvantově-mechanický efekt, který dává světlu a obecně elektromagnetickému záření tři zajímavé vlastnosti: monochromaticnost, koherenci a malou divergenci. Zejména díky malé rozbíhavosti nacházejí lasery uplatnění jednak při přenášení signálů a zaměřování, jednak v různých druzích bezkontaktního obrábění, tavení a odpařování používaných v mnoha oborech lidské činnosti od strojírenství a elektrotechnického průmyslu přes medicínu až po vojenství, včetně výzkumu termojaderné fúze. Přestože byl princip laseru teoreticky předpovězen již v roce 1917 (Einstein, 1917), jeho realizace se zdařila až o 36 let později, v roce 1953. Jednalo se o stimulovanou emisi záření v oboru mikrovln, a proto byl pro tento zdroj zvolen název MASER. Skutečný LASER pro viditelné světlo, konkrétně červené barvy byl předveden o 7 let později, v roce 1960, Theodorem H. Maimanem. A již za 4 roky poté, v roce 1964, byla v souvislosti s laserem udělena Nobelova cena a laserová technika se začala rychle rozvíjet. Kromě viditelných laserů byly na tomtéž principu vyvíjeny zdroje pracující v infračervené i ultrafialové oblasti. Pro všechny obory vlnových délek s výjimkou mikrovln se ujalo jednotné označení LASER s tím, že světlo se chápe v zobecněném smyslu.

1.2. První XUV lasery

Zatímco konvenční, tedy viditelné, ultrafialové a infračervené lasery se již rutinně vyrábějí a používají po dlouhá léta, lasery s extrémně krátkými vlnovými délkami se vyvíjely pomaleji, zejména z důvodu větší náročnosti, jak po stránce fyzikální, tak po stránce technické. Aktuálně se jedná se o oblast vlnových délek cca od 10 nm do 100 nm, která spadá pod několik ne zcela jednoznačných označení – viz [tab. 1-1](#). My budeme v dalším textu používat označení XUV, přestože odpovídající lasery byly v době, kdy vznikaly, označovány jako „lasery pracující v měkké rentgenové oblasti“ („Soft x-ray lasers“).

Tab. 1-1 Varianty označení používané pro oblast vlnových délek od 10 nm do 100 nm

Označení	Interval vlnových délek (nm)	
	Od	Do
UVC (Ultra Violet C)	Neurčeno	280
FUV (Far UV)	10	200
EUV nebo XUV (EXtreme UV)	0,1	31 někdy až 100
Soft x-ray	0,1	10 někdy až 100

Kratší vlnová délka elektromagnetického záření znamená vyšší energii jeho kvanta a tedy i větší potřebnou změnu energie v systému, který má takové záření emitovat. V atomu to odpovídá přechodům mezi energetickými stavy vnitřních elektronů, takže si již nevystačíme s pouhou excitací neutrálních atomů jako v případě viditelného záření, ale musíme atomy nejprve příslušně ionizovat. Druhou komplikací je vysoká pohltivost jakéhokoli hmotného prostředí pro XUV záření, takže tyto lasery je nutno aplikovat ve vakuu a při jejich generaci nelze využít polopropustné zrcadlo umožňující tři- a více-násobný průchod aktivním prostředím, jak je to běžné u konvenčních laserů.

První XUV laser vytvořili Matthews a spol. roku 1985 pomocí obřího viditelného laseru Novett v Lawrence Livermore National Laboratory, USA. Zaostřením jeho pulzu do úzké, cca 1 cm dlouhé linie na terčík tvořený tenkou vrstvou selenu byl k dispozici výkon 50 TW/cm^2 , čímž vzniklo 24-násobně ionizované plazma, které generovalo první XUV laser, o vlnové délce cca 21 nm (Matthews et al., 1985).

Prvními aplikacemi XUV laseru byly XUV holografie (Trebes et al., 1987), XUV interferometr (Celliers et al., 1995), XUV radiografie pro sledování dynamiky plazmatu (Key et al., 1995) a XUV mikroskop (Da Silva et al., 1992).

Paralelně s převažujícími XUV plazmatickými lasery (buzenými např. konvenčními lasery) byly využívány i další fyzikální principy jako např. generace vysokých harmonických frekvencí konvenčních femtosekundových laserů, jež vynikají širokou přeladitelností vlnové délky, krátkou dobou pulzu a malou divergencí svazku. Nicméně, z hlediska praktické využitelnosti pro předpokládané aplikace v širším měřítku nebyla žádná z uvedených variant ekonomicky přijatelná. To se týkalo i technicky nejpokročilejší varianty XUV laseru na volných elektronech, realizované poprvé roku 2000 v DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) u Hamburku.

1.3. Roccaův stolní XUV laser 46.9 nm

V roce 1994, po desetiletém výzkumu vytvořil J.J. Rocca první kompaktní stolní XUV laser s vlnovou délkou 46.9 nm pracující na principu impulzního silnoproudého výboje v kapiláře plněné zředěným argonem, kde jako aktivní prostředí slouží husté horké plazma tvořené neonu-podobnými ionty Ar^{8+} (Rocca, et al., 1994). Praktické uplatnění XUV laserů se tím zpřístupnilo k širšímu využití. Z potenciálních aplikací se nabízela pestrá škála od materiálového výzkumu a přímého nanostrukturování povrchu pevných látek, přes diagnostiku plazmatu, XUV mikroskopii a holografii až po metrologii. Proto podle Roccova vzoru vznikala analogická zařízení na dalších místech světa:

v Japonsku (Niimi et al., 2001), v Izraeli (Ben-Kish et al., 2001), v Itálii (Tomassetti et al., 2002), a také v České Republice (Kolacek et al., 2002). K nim se postupně dále připojovala pracoviště v Rusku, Malaisii, Číně, Indii a další.

1.4. První aplikace Roccova laseru

Zatímco po celém světě vznikaly nové laboratoře pracující na různých obměnách Roccova laseru, J.J. Rocca se kromě zdokonalování vlastního přístroje a zkoumání dalších typů XUV laserů podílel mimo jiné i na řadě pilotních projektů, které postupně prokazovaly proveditelnost zásadních aplikací jeho XUV laseru – viz [tab. 1-2](#), čímž pomáhal otevírat cesty k jejich širšímu zkoumání a praktickému využívání.

Tab. 1-2 Vybrané pilotní aplikace Roccova laseru realizované s jeho účastí

<i>rok</i>	<i>Druh aplikace</i>	<i>citace</i>
1999	XUV Interferometr pro diagnostiku plazmatu	Rocca et al., 1999
1999	Fokusace laserového svazku a ablace kovového terče	Benware et al., 1999
2001	Charakterizace difrakční mřížky pomocí XUV laseru	Seminario et al., 2001
2005	Ablace organických polymerů	Juha et al., 2005
2005	XUV mikroskopie	Vaschenko et al., 2005
2006	Nanostrukturování povrchů pomocí XUV interferometru	Capeluto et al., 2006
2006	XUV holografie	Wachulak et al., 2006
2006	Ablace hladkých otvorů ϕ 82 nm do PMMA	Vaschenko et al., 2006
2007	Nanotečky - XUV interferometrické nanostrukturování	Wachulak et al., 2007
2008	Prakticky použitelná XUV holografie – obraz nanotrubky	Wachulak et al., 2008

1.5. Česká varianta Roccova laseru CAPEX a cíle mé práce

Motivací k zahájení programu CAPEX (CAPillary EXperiment) skupinou RNDr. Karla Koláčka, CSc. v ÚFP AVČR v roce 1997 byly na jedné straně zmíněné perspektivní aplikace Roccova laseru a na druhé straně fakt, že pro tuto práci zde byly dobré výchozí předpoklady, jak po stránce vybavení a zařízení laboratoře, tak po stránce zkušeností s technikou vysokonapěťových silnoproudých výbojů. V předkládané práci bych rád ukázal, že kromě unikátní průkopnické práce, kterou v této oblasti vykonal J. J. Rocca, může být zajímavé, poučné i přínosné, vydáme-li se k těmto cílům jinou cestou.

Když jsem se v roce 2003 do této práce zapojil, probíhaly již pokročilé funkční zkoušky kompletní aparatury s cílem prokázat generaci laserového signálu na očekávané vlnové délce 46.9 nm. Nicméně mnoho práce bylo třeba teprve dokončit, konkrétně zejména ty práce, které jsou předmětem kapitoly [Optimalizace aparatury CAPEX \(3.\)](#). Zabýval jsem se tedy zdokonalováním aparatury včetně diagnostických prostředků a zároveň jsem se podílel na aplikačních experimentech, jakmile je aparatura začala umožňovat.

A. Software pro interpretaci XUV atomových spekter

Prvním cílem bylo vytvořit software, s jehož pomocí by bylo možno věrohodně identifikovat první náznaky laserování na základě sejmutých XUV spekter.

B. Vývoj technologie výroby kapiláry

Druhým cílem bylo nalezení vhodnějšího způsobu výroby kapiláry, která v té době nevyhovovala ani technicky ani ekonomicky, a navíc nevydržela déle než několik desítek výstřelů.

C. Objasnění příčin předčasné destrukce kapilár

Třetím cílem, bylo vypátrat a odstranit příčiny rychlé destrukce kapiláry. Toto pátrání postupně vyústilo do komplexní optimalizace aparatury CAPEX jak po stránce konstrukční, tak z hlediska provozního režimu.

D. XUV laserová ablace a nanostrukturování povrchů pevných látek

Paralelním cílem byla a fokusace XUV laserového svazku multivrstevným sférickým zrcadlem, jeho zaměření a interakce s povrchem PMMA. Na základě pozorování nanostruktur byl tento program rozšířen o nanostrukturování povrchů.

E. Expozice magnetických vrstev zeslabeným fokusovaným laserovým svazkem

Ve spolupráci s polským Fyzikálním ústavem jsme si dali za cíl exponovat vzorky safíru s nanosenými trojvrstvami Pt, Co, Pt těsně pod ablačním prahem pro sledování možnosti ovlivnění jejich magnetických vlastností XUV laserem.

F. Pozorování povrchu kráteru v průběhu ablace

Dalším naším cílem bylo přispět k lepšímu pochopení interakce fokusovaného XUV laserového svazku s povrchem vzorku jeho detailním bočním fotografováním.

G. Vytváření kráterů do těžko ablovatelných materiálů

Na základě podnětu japonských kolegů jsme si dali za cíl vytvoření a studium kráterů v materiálech s vysokou radiační odolností - W, Mo a SiC.

H. Experimenty s depozicí tenkých vrstev

Vzhledem k dosahované energii XUV laseru CAPEX jsme byli požádáni o spolupráci při pokusech o nanosení materiálu uvolněného při vytvoření kráteru fokusovaným XUV laserem na jiný materiál, umístěný v jeho těsné blízkosti.

I. Expozice vzorků BaF₂ při různých teplotách

V průběhu česko-čínské spolupráce vznikla idea rozšířit expozice vzorků o volitelnou teplotu interakce v rozmezí od -180° C do +200° C.

J. Metrologická měření

Pro kalibraci aparatury CAPEX bylo třeba pro danou vlnovou délku znát skutečnou odrazivost používaných multivrstevných zrcadel a také skutečnou propustnost filtrů, takže dalším z cílů naší experimentální práce byla ještě tato metrologická měření.

V následujících kapitolách si dovoluji ukázat, že všechny tyto cíle byly v přiměřeném rozsahu postupně dosaženy.

2. Aparatura CAPEX

2.1. Použité fyzikální principy

2.1.1. Zjednodušený obecný princip konvenčních laserů

Laserový pulz vzniká v aktivním prostředí, do kterého byl vhodným způsobem načerpán určitý přebytek energie, který vytvoří dočasnou nerovnováhu a díky této nerovnováze, krátkodobě nastává situace, kdy atomy nebo molekuly krátkodobě poruší princip minimální energie a ve větší míře obsadí některé vyšší energetické stavy, zatímco nižší stavy zůstanou méně obsazené - nastane tzv. inverze populace. Samotná existence inverze populace však ještě nevysvětluje vznik laseru. Ten se vytváří až na základě jevu, nazývaného „stimulovaná emise“ a předpovězeného již Einsteinem (Einstein, 1917). Díky tomuto efektu může foton, generovaný spontánním přechodem mezi dvěma elektronovými stavy v jednom atomu přimět (stimulovat) jiný atom v totéž stavu k témuž přechodu, takže k původnímu fotonu se přidá druhý foton stejné vlnové délky, fáze a také polarizace a směru šíření. Jelikož smyslem laseru je hlavně malá rozbíhavost, aktivní prostředí se volí obvykle ve tvaru dlouhého válce, aby osově se pohybující fotony měli ke stimulaci dalších připravených atomů více příležitostí, než fotony postupující v jiných směrech. Navíc se u konvenčních laserů používá několikanásobný průchod ve směru osy válce díky dvěma zrcadlům umístěných na jeho základnách proti sobě, přičemž jedno z této dvojice je poloprůhledné, aby část fotonů takto vygenerovaného laserového svazku mohla projít ven, zatímco zbytek se opakovaně odráží a během dalších průchodů aktivním prostředím stimuluje k emisi další a další atomy. Výsledkem je zesílení světla stimulovanou emisí záření – Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation, čili LASER – úzký a málo se rozbíhající svazek koherentního, monochromatického záření.

2.1.2. Specifika plazmatických XUV laserů

Má-li být plazma schopno generovat pulz laserového záření v XUV oblasti, vyžaduje to v první řadě přítomnost několikanásobně ionizovaných atomů, protože teprve po několikanásobné ionizaci jsou vnitřní, vysokoenergetické elektronové hladiny atomů zpřístupněny pro elektronové přechody a atomy začínají vyzařovat v oblasti XUV. Druhou podmínkou je alespoň krátkodobá stabilita takové ionizace. Proto se jakožto laserující prostředí volí takové ionty, jejichž elektronová konfigurace odpovídá nějakému stabilnímu prvku, obvykle Ne, Ni, případně H nebo Li. Konkrétně pro neonu podobné 8-mi násobné ionty Ar je to názorně vidět na skoku ionizačních potenciálů na [obr. 2-1-c](#). K dosažení významného podílu zvoleného typu iontů a pro vytvoření populační inverze v XUV oblasti se při ohřevu plazmatu využívají v podstatě dvě cesty:

1. *Srážkově ionizační laserové schéma*

Zahříváme-li např. argonové plazma, dochází k četnějším srážkám volných elektronů s ionty a ty jsou těmito srážkami dále ionizovány. Postupně přibývá vícenásobných iontů, a jakmile se vytvoří převaha osmi-násobných (neonu podobných) Ar iontů, proces ionizace se zpomalí, protože osminásobné ionty Ar mají právě uzavřenou vnější elektronovou slupku a pro její narušení je třeba skokově větší energie. Pro dosažení převahy neonu podobných iontů nemusí tedy být dodaná energie odměřena přesně, a stačí, když leží v určitém poměrně širokém intervalu, což je v praxi dobře dosažitelné. Dalšími srážkami se ionty excitují za vytvoření populační inverze vhodných laserových hladin a může vzniknout XUV laserový pulz. Tato cesta se nazývá „srážkově ionizační laserové schéma“.

2. Srážkově rekombinační laserové schéma

Reprezentantem druhé cesty pro generaci XUV laserů je dvoustupňový postup, kdy v prvním kroku se vybraný prvek ohřeje tak, aby se zbavil všech elektronů, což je poměrně stabilní stav, neboť další mírné zvyšování teploty již nemá dramatický vliv a pro dosažení tohoto stavu stačí do plazmatu dodat určitou minimální energii. Druhým krokem je takové ochlazení plazmatu, aby u významného podílu plně ionizovaných atomů došlo k rekombinaci právě jedním elektronem. Tím se z nich stanou vodíku podobné ionty - analogie vodíkového atomu, ovšem s elektricky nabitými jádry původního prvku. Přitom se předpokládá, že rekombinace vzhledem ke stále poměrně vysoké teplotě neprobíhá přednostně do základního stavu, ale tak, že se významná část zachycených elektronů usadí nejprve v excitovaném stavu vhodném pro laserový přechod, kde vytvoří populační inverzi. Tato druhá cesta se nazývá „srážkově rekombinační laserové schéma“.

2.2. Princip Roccova laseru využitý u aparatury CAPEX

Z obou uvedených XUV čerpacích schémat se jako schůdnější a úspěšnější ukázalo schéma srážkově ionizační, použité J.J.Roccou v jeho stolním XUV argonovém laseru (Rocca et al., 1994), který se stal vzorem pro další laboratoře, mimo jiné i pro náš CAPEX. Na obr. 2-1a,b si můžeme připomenout elektronové konfigurace neutrálního argonu a jednoduchého iontu Ar^{1+} a na obr. 2-1c je z průběhu ionizačních potenciálů argonu dobře vidět, proč jsou neonu podobné ionty (Ne-like Ar) relativně stabilní v širokém intervalu teplot plazmatu. Elektronovou konfiguraci základního stavu těchto iontů vidíme na obr. 2-1d a na obr. 2-1e je vyznačena jeho excitace do horní hladiny laserového přechodu, kdy jeden z šesti elektronů ve stavu **2p** přechází do stavu **3p**, odkud se laserovým přechodem dostane do stavu **3s** ze kterého se vrátí do zpět základního stavu. Vznik populační inverze mezi hladinami **3p** a **3s** je umožněn zejména jejich rozdílnou rychlostí samovolného vyzařování. Potom v situaci, kdy první z elektronů, nahromaděných na hladině **3p** samovolně přeskóčí do stavu **3s** a vyzáří odpovídající kvantum XUV záření, stimuluje tím další elektron ke stejnému přeskočení a výsledkem je lavina identických XUV fotonů – XUV laserový pulz.

Konkrétní realizace tohoto principu pomocí impulzního silnoproudého výboje v plynu plněné kapiláře je schematicky sekvenčně znázorněna v pravém sloupci obr. 2-1f-k:

f) Sloupec zředěného, mírně ionizovaného argonu je připraven v keramické kapiláře opatřené dvojicí elektrod, přičemž jedna elektroda obsahuje malý otvor pro vyvedení laserového svazku z kapiláry.

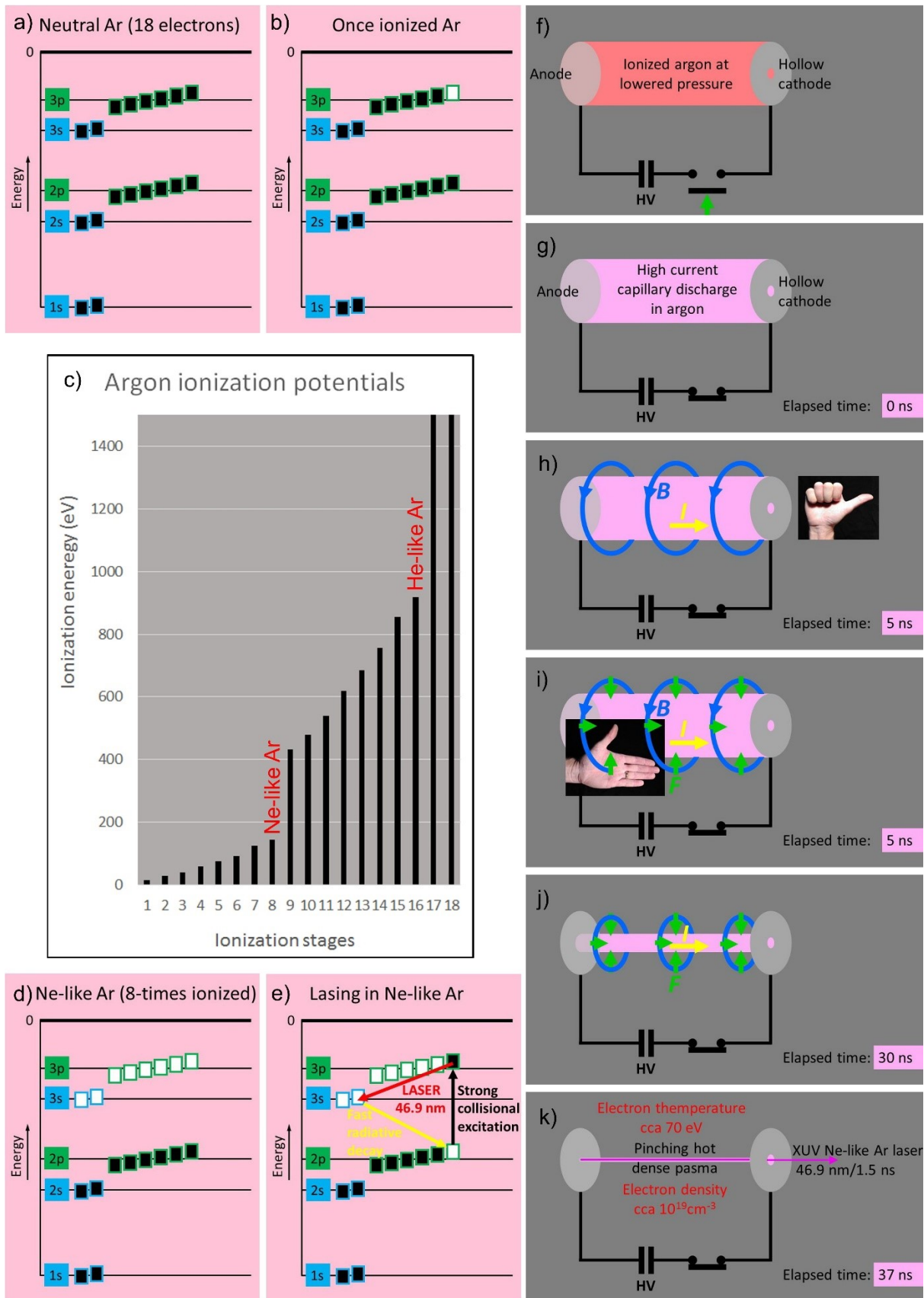
g) Přiložené vysoké napětí vytvoří v argonu silnoproudý výboj, prostorově stabilizovaný stěnou kapiláry.

h) Elektrický výbojový proud procházející kapilárou vyvolá na základě Ampérova pravidla pravé ruky silné cirkulární magnetické pole.

i) Toto magnetické pole působí Lorencovou silou na proudová vlákna u povrchu plazmatického sloupce a podle Lentzova pravidla levé ruky je stlačuje směrem k ose. Díky válcové symetrii tak dochází k silné, v ideálním případě rovnoměrné kompresi plazmatu.

j) Během několika nanosekund se poloměr plazmatického sloupce zmenší více než 10x.

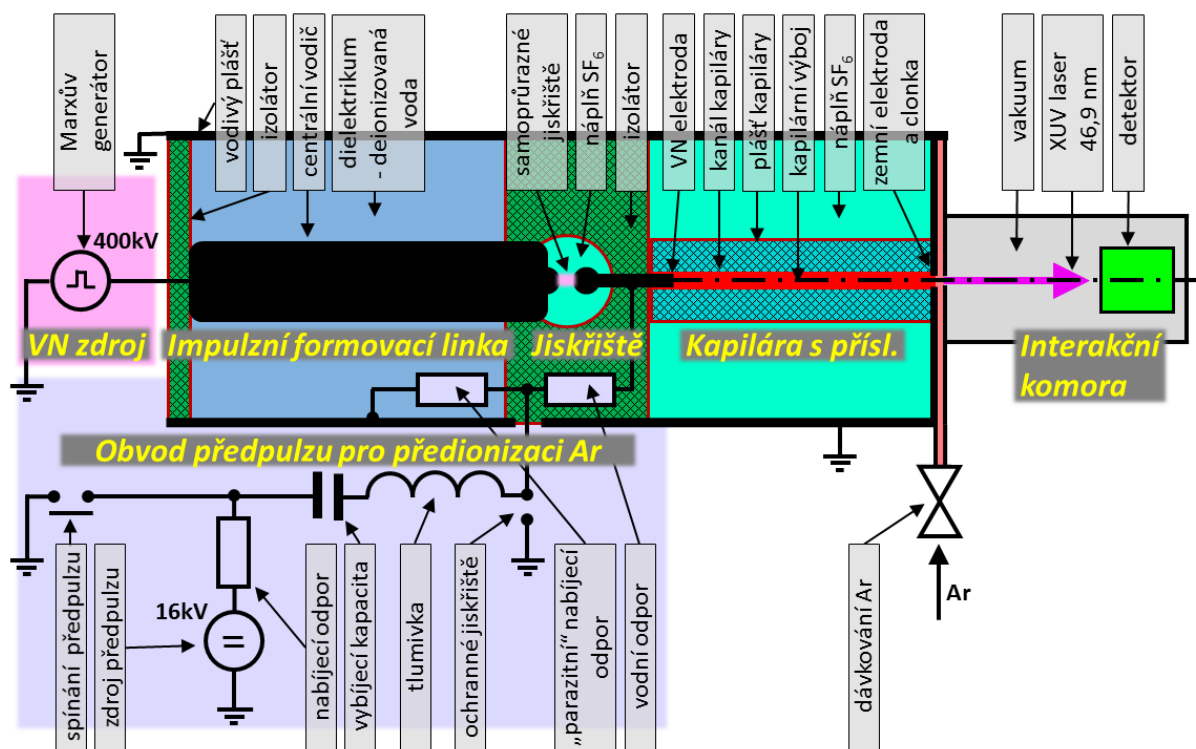
k) Tato komprese vede k prudkému nárůstu teploty a hustoty a zastaví se až poblíž osy, díky kompenzaci Lorentzovy síly gradientem tlaku silně stlačovaného plazmatu. Na okamžik se tak v argonovém horkém hustém plazmatu ustaví podmínky vhodné pro laserování v oboru XUV podle tříhladinového diagramu na obr. 2-1e.



Obr. 2-1 Princip Roccova laseru – a) elektronová konfigurace neutrálního Ar, b) jedenkrát ionizovaný Ar, c) ionizační potenciály Ar, d) elektronová konfigurace 8x ionizovaného Ar, e) tříhladinový diagram laserování neonu podobného Ar, f) až k) sekvenční schematické znázornění generace XUV laseru silnoproudým kapilárním výbojem.

2.3. Blokové schéma a funkce aparatury CAPEX

Uspořádání aparatury CAPEX a tím i její funkce je patrna z blokového schématu na [obr. 2-2](#): *Vysokonapěťový pulzní zdroj* reprezentovaný *Marxovým generátorem* je připojen ke koaxiální *impulzní formovací lince*, představované válcovým kondenzátorem naplněným *deionizovanou vodou* ve funkci *dielektrika*. Po nabití linky na mezní napětí se prorazí *jiskřiště* plněné SF_6 a rychlý napěťový impuls se dostane na *VN elektrodu* zavedenou do keramické *kapiláry* zpevněné polyuretanovým *pláštěm*. Ke druhému konci kapiláry je připojena *zemní elektroda* opatřená malým koncentrickým otvorem pro průběžné plnění kapiláry pracovním plynem přes *jehlový ventil pro dávkování Ar*. Rychlý *kapilární výboj* za vhodných podmínek generuje pulz *XUV laseru*, který prochází *clonkou* do *interakční komory*, kde je ve *vakuu* za *aluminiovým filtrem* pro oddělení dlouhovlnného pozadí umístěn *detektor*. Po vysunutí detektoru může být laserový pulz dále využit. Takto popsany proces je sice principiálně funkční, ale pro optimální provoz je důležité, aby pracovní plyn byl předem mírně ionizován, tedy předionizován a to definovaným způsobem. *Obvod předpulzu pro předionizaci Ar* slouží k aplikaci poněkud nižšího vysokého napětí do argonového sloupce v kapiláře krátce před spuštěním hlavního pulzu. *Vybíjecí kapacita* se nabíjí ze *zdroje předpulzu* přes *nabíjecí odpor* díky *parazitnímu odporu* uzavírajícímu obvod přes *deionizovanou vodu* na *vodivý plášť formovací linky*. Jako ochrana proti zpětnému proudu hlavního výboje do *zdroje předpulzu* slouží *vodní odpor*, *tlumivka* a *ochranné jiskřiště*. Parametry předpulzu lze volit nastavením napětí *zdroje předpulzu*, volbou *vybíjecí kapacity* a velikosti *vodního odporu* a podle potřeby nastavením *zpoždění* mezi *spínáním předpulzu* a *Marxova generátoru*.



Obr. 2-2 Blokové schéma aparatury CAPEX

2.4. Počáteční varianty aparatury CAPEX v době před prokázáním laserování

V **P3** - Kolacek et al. (2008) je popsán vývoj aparatury CAPEX od jeho zahájení v roce 1997 včetně postupně se zlepšujících naměřených výsledků, až do stavu, kdy bylo v roce 2004 prokázáno XUV laserování. Za zmínku stojí, že hlavními předměty vývoje již tehdy byly kapilára, její napojení na aparaturu a systém předionizace, jehož význam byl však zpočátku podceňován.

2.5. Spektroskopické prokázání laserování

V roce 2005 bylo na aparatuře CAPEX spektroskopicky prokázáno laserování na vlnové délce 46.9 nm. V **P7** - Straus et al. (2005) je popsán postup, jakým to bylo provedeno pomocí vlastního software pro interpretaci atomových spekter (**P6** - Straus et al., 2004), stručně popsaného v části **Interaktivní systém pro interpretaci atomových spekter (4.1.)**. Experimentální spektra byla porovnávána s modelovými spektry pro nastavitelnou teplotu elektronů a shodovala se s modelem pro cca 100 eV a navíc měla výrazný pík na vlnové délce 46.9 nm, což jednoznačně nasvědčuje laserování neonu podobného argonu.

3. Optimalizace aparatury CAPEX

Cesta od prvních známek funkčnosti k rutinně použitelné, spolehlivé aparatuře nebyla přímočará, ani předem zřejmá. Pokud bychom ji popisovali chronologicky, ukázalo by se, že zahrnovala slepé uličky, jejichž prozkoumávání někdy vedlo k náhodnému objevení nečekaných souvislostí, které pak překvapivě vyřešily více problémů najednou. Rozhodující roli přitom hrála otázka předionizace, která se ukázala jako zásadní. Přitom proces hledání a postupného odstraňování příčin nevyhovujícího chování aparatury probíhal pouze příležitostně, jako vedlejší činnost při intenzivní snaze o vyzkoušení prvních aplikací.

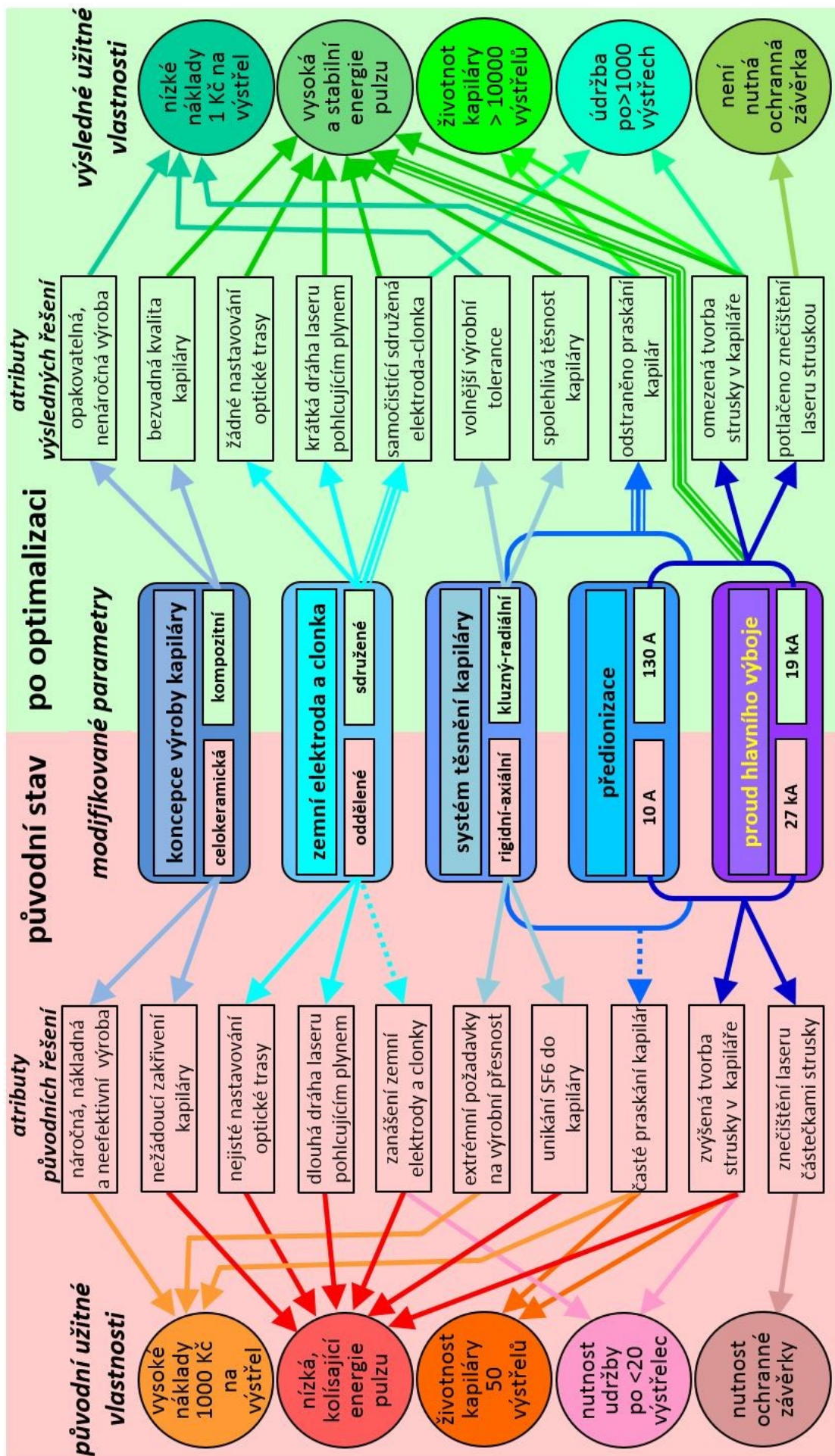
3.1. Schéma optimalizace

Při vynechání popisu cest, které nikam nevedly, můžeme optimalizaci přehledně znázornit pomocí grafického vyjádření uvedeného na **obr. 3-1**. Spodní, růžově podbarvená část obrázku představuje původní stav a horní, zeleně podbarvená část stav po optimalizaci. Zcela dole jsou v pěti kruzích popsány problematické užité vlastnosti původní aparatury. Ve střední části **obr. 3-1** jsou na rozhraní růžového a zeleného podbarvení vyznačeny ty parametry nebo části aparatury, které byly postupně vytipovány jako možné příčiny nežádoucích vlastností a v pásu pod nimi jsou atributy s nimi spojené, jež jsou logickými příčinami jednotlivých nežádoucích užitečných vlastností, jak je naznačeno šipkami. Spodní, do červena zbarvená polovina obrázku tak představuje původní stav aparatury CAPEX a v horní, do zelena zbarvené polovině je

analogickým způsobem osově symetricky znázorněn stav po její optimalizaci. Kromě jednoduchých šipek, vyznačujících logické příčinné vazby, jsou zde ještě tečkované šipky, představující takové příčinné vazby, které teprve dodatečně vyplynuly ze souvislostí a dále trojitě šipky, jimiž jsou vyznačeny takové důsledky, které jsme dopředu vůbec nepředpokládali a jež tedy představují dodatečný bonus provedené optimalizace.

Vycházejí ze střední části [obr. 3-1](#), popíšeme pro každou z pěti modifikovaných oblastí atributy původního řešení, jež vedly k nežádoucím užitným vlastnostem vypsáním v pěti kruzích na spodní straně a v kontrastu s tím atributy výsledných řešení, jež vedou k výhodným vlastnostem, uvedeným v pěti kruzích nahoře.

1. Koncepce výroby kapiláry. Změnou koncepce výroby kapiláry z celokeramické na kombinovanou byly odstraněny problémy s její náročnou, nákladnou a přesto málo efektivní výrobou. Zároveň se prakticky odstranilo obvyklé zakřivení kapiláry, které zhoršovalo vyhlídky na její správné fungování.
2. Zemní elektroda a clonka. Standardní uspořádání obsahovalo dvě samostatné součástky s centrálními otvory – zemní elektrodu a clonku, jež bylo třeba postupně a s velkou přesností souose namontovat na zemní konec kapiláry. V tom byl častý problém, protože přesnost montáže obvykle nebyla dostatečná. Navíc dráha laserového svazku mezi těmito dvěma součástkami procházela oblastí, ve které již nebyla vybudována populační inverze, takže v ní docházelo ke zbytečné absorpci. Ještě vážnějším problémem bylo zanášení zemní elektrody i clonky struskou. Nové řešení spočívá ve spojení elektrody a clonky do jedné součástky, která se definovaně nasadí na zemní konec kapiláry, čímž odpadá jejich vzájemné nastavování při montáži. Jelikož obě součástky splynuly do jedné, podstatně se tím zkracuje dráha laserového paprsku pohlcujícím plynem. Překvapivým a nezamýšleným důsledkem sružení clonky s elektrodou je jakýsi efekt, popsáný v části [Optimalizovaná sdružená zemní elektroda a radiální těsnění \(3.4.2.\)](#), který prakticky eliminuje její zanášení struskou.
3. Systém těsnění kapiláry. Původní systém těsnění kapiláry v aparatuře pomocí klasického osového přitlaku na o-kroužky umístěné na obou protilehlých čelech kapiláry vyžadoval přísné tolerance délky kapiláry, byl funkčně nespolehlivý a přenášel na kapiláru extrémní mechanické namáhání. Radiální, kluzné těsnění funguje spolehlivěji, umožňuje volnější délkovou toleranci kapiláry, nezatěžuje kapiláru enormním osovým tlakem a účinně absorbuje osové rázy během výstřelu, což přispělo k odstranění praskání kapilár.
4. Předionizace a proud hlavního výboje. Zvýšení proudu předpulzu z doporučených 10 A na 130 A přineslo nečekané důsledky. Bylo pozorováno zvýšení energie laserového pulzu, které do jisté míry přetrvalo i při snížení hlavního proudu z 27 kA na 19 kA. Tím se podstatně omezila tvorba a usazování strusky uvnitř kapiláry. Zároveň tím bylo potlačeno znečištění laserového svazku vystřelovanými částicemi strusky.



EX. Jednoduché šipky přechází na šipkami jsou vyznačené

Jak lze vidět porovnáním textu v kroužcích na dolním a horním okraji [obr. 3-1](#), po optimalizaci se snížily náklady na 1 výstřel cca 1000x, energie laserového pulzu se stabilizovala, životnost kapiláry se zvýšila cca 200x a doba bezporuchového provozu vzrostla cca 50x. K tomu je nutno poznamenat, že údržba aparatury je po optimalizaci nesrovnatelně snadnější a namísto celodenní vyčerpávající práce s nejistým výsledkem představuje poměrně jednoduchou rutinní operaci zvládnutelnou zhruba do 1 hodiny. Navíc bylo možno upustit od technicky náročné a ne zcela spolehlivé ochranné závěrky pro separaci znečišťujících částic strusky od laserového svazku před jeho vstupem do interakční komory.

Popsanou optimalizací se z aparatury CAPEX stal relativně silný, reprodukovatelný a prostorově stabilní XUV laserový zdroj. V následujících podkapitolách se výše popsanými modifikacemi budeme zabývat podrobněji

3.2. Defektoskopie - předčasná destrukce kapiláry

Bez ohledu na použitou technologii výroby kapiláry, docházelo vždy velmi rychle k její degradaci, a to hned dvěma způsoby. Jednak se funkčnost každé kapiláry zhoršovala



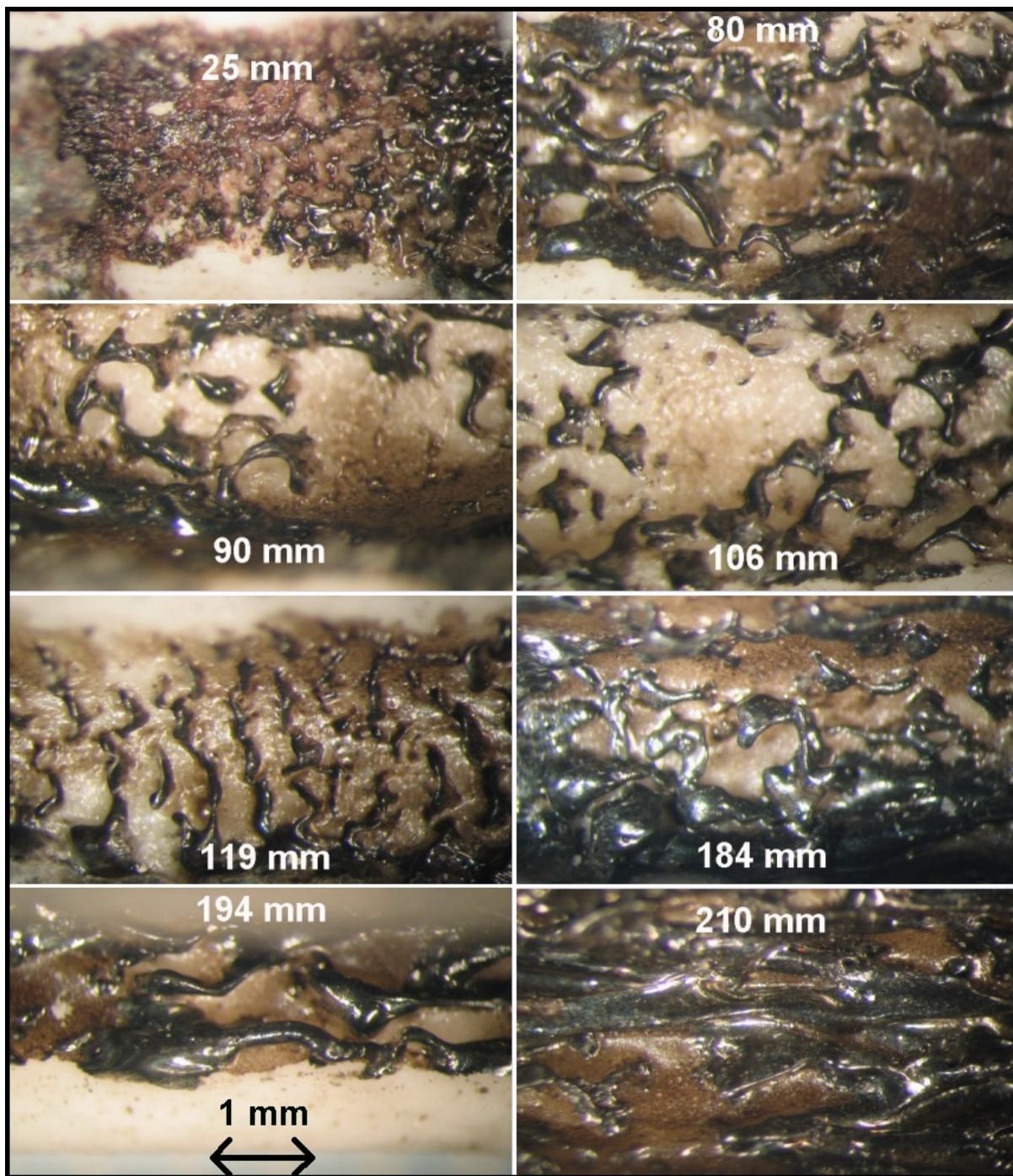
Obr. 3-2 Kapiláry poškozené v počátečním stadiu vývoje aparatury CAPEX.

postupně již po několika málo desítkách výstřelů, a jednak někdy docházelo ke ztrátě funkce skokem. Z fotografií na [obr. 3-2](#) je zřejmé, že spotřeba kapilár v počáteční fázi vývoje byla enormní. Jejich rychlá degradace znemožňovala systematičtější práci s aparaturou CAPEX do té míry, že bylo nutné věnovat se jejich životnosti podrobněji.

Zkoumání vnitřku poškozených kapilár optickým mikroskopem ukázalo, že postupné zhoršování jejich funkce způsobuje struska vyskytující se na jejich vnitřní stěně a skokové zhoršení, že patrně souvisí s podélnými prasklinami objevujícími se v některých kapilárách.

3.2.1. Struska na vnitřní stěně kapiláry

Výsledek studia degradovaného vnitřního povrchu kapiláry je popsán v [P8 - Straus et al., 2006](#). Za zmínku stojí převzatý [obr. 3-3](#), na němž je přehled mikrofotografií strusky, měnící svůj charakter se vzdáleností od začátku kapiláry. Bylo konstatováno, že sklovitá struska černé barvy je tvořena Al_2O_3 , tedy materiálem kapiláry, a že vzniká natavením její vnitřní stěny při každém výstřelu.



Obr. 3-3 Mikrofotografie vnitřního povrchu korundové kapiláry po 300 výstřelech. Kapilára byla 230 mm dlouhá a vnitřní průměr byl 3 mm. Na každém ze snímků je vyznačena vzdálenost jeho středu od vysokonapěťového konce kapiláry. Délka vnoření vysokonapěťové elektrody do kapiláry byla 23 mm. (Stopa jejího konce je viditelná na levé straně prvního snímku.) (P8 - Straus et al., 2006).

3.2.2. Podélné praskliny ve stěně kapiláry

Druhý způsob destrukce kapiláry tj. její praskání, nebyl zcela jednoznačně objasněn. Na jednu stranu se lze domnívat, že praskání mohlo být způsobeno rázy z jiskřiště přenášenými na kapiláru masívními čelními přírubami, mezi nimiž byla pevně sevřena. Na druhou stranu k praskání mohl vést i extrémní tlak plazmatu v kapiláře během nějakého nestandardního výstřelu, např. bez předionizace. Typická prasklina je na obr. 3-4. Vidíme, že je téměř dokonale

rovinná a probíhá rovnoběžně s osou kapiláry téměř v celé její délce. S výjimkou násilně odlomených bílých okrajů je plocha lomu pokryta černou struskou, vzniklou provozováním již prasklé kapiláry do té doby, než se zjistila ztráta její funkce. Obvykle se vyskytovalo 4 až 6 prasklin, vzájemně pootočených kolem osy kapiláry.



Obr. 3-4 Typicky prasklá keramická kapilára o délce 320 mm a o vnitřním průměru 3 mm s polyuretanovým pláštěm. Stav po rozříznutí polyuretanového pláště poblíž okrajů a po rozlomení konců keramické kapiláry - bílý lom v délce cca 10 mm.

3.2.3. Doporučená opatření

Pro omezení tvorby strusky byly v **P8 - Straus et al. (2006)** navrženy tři skupiny možných opatření:

1. Optimalizace pinče

V úvahu přicházela možnost ovlivňování pinče následujícími faktory:

- a) kvalita předionizace,
- b) průběh nárůstu proudu hlavního výboje, včetně jeho jemných zákmitů,
- c) hladkost vnitřní stěny kapiláry,
- d) elektrický odpor materiálu kapiláry,
- e) tvar elektrod.

2. Volba materiálu kapiláry

Výhodné by bývalo bylo použít materiály s vyšším bodem tání a případně též s vyšší tepelnou vodivostí. V úvahu přicházely:

- a) karbid křemíku – SiC,
- b) bor nitrid – BN – kubická forma.

3. Redukce energetické zátěže kapiláry

V úvahu přicházelo snížení expozice povrchu kapiláry proudem hlavního výboje a to změnou:

- a) doby nárůstu proudu,
- b) amplitudy proudu,
- c) průběhu poklesu proudu,
- d) velikosti vnitřního povrchu kapiláry.

Ze všech výše uvedených návrhů opatření jsme hlubší pozornost věnovali pouze dvěma z nich: bodu 1a) – kvalita předionizace a bodu 3b) – amplituda proudu hlavního výboje, v kapitole [Režim generace laserujícího plazmatu - předionizace a proud hlavního výboje \(3.5\)](#), kde je mimo jiné uvedeno, že kombinace těchto dvou opatření nakonec vedla k potlačení tvorby strusky na přijatelnou úroveň.

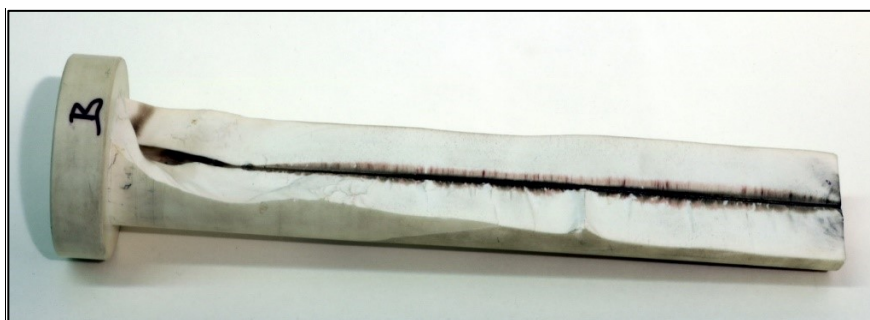
Pro zamezení praskání kapilár nás zpočátku nenapadlo žádné opatření. Situace se nakonec vyřešila po změně rigidního axiálního těsnění kapiláry na kluzné radiální, po eliminaci výstřelů bez předpulzu a po zvýšení předpulzu za současného snížení proudu hlavního výboje, jak o tom bude řeč v následujících kapitolách. Kapiláry nyní již nepraskají a jsme přesvědčeni, že tomu podstatnou měrou dopomohla změna způsobu uchycení kapiláry.

3.3. Technologie – hledání efektivnější koncepce výroby kapiláry

Kapilára představuje nejdůležitější část aparatury CAPEX. Je tvořena tepelně a mechanicky odolnou izolační trubicí o vnitřním průměru cca 2 až 5 mm a délce cca 20 až 50 cm. Její vnější tvar je přizpůsoben pro hermetické uložení do aparatury, přičemž do jednoho jejího konce je zavedena vysokonapěťová elektroda a na druhý konec v původním uspořádání nasedá dutá zemní elektroda s plnicí komůrkou a clonkou pro vyvedení laserového svazku do vakuové interakční komory.

3.3.1. Původní stav - celokeramická kapilára

Ukázka prvního typu kapiláry aparatury CAPEX je na [obr. 3-5](#). Konkrétně se jedná o kapiláru s vnitřním průměrem 1 mm, i když běžný byl průměr 3 mm.

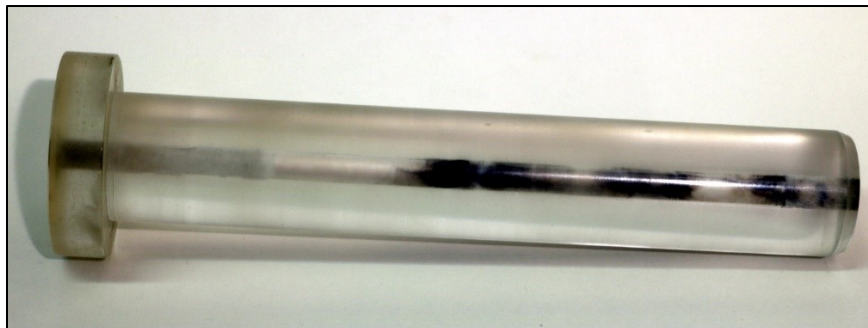


Obr. 3-5 Torzo celokeramické kapiláry s vnitřním průměrem 1 mm.

Vyráběla se ve dvou fázích: V první fázi se z polotovaru z obrobitelné keramiky třískovým obráběním vytvořil potřebný tvar a ve druhé fázi se kapilára vypálila. Jenže vlivem gravitace docházelo během vypalování k zakřivení vnitřního kanálu kapiláry, takže ne každý takto získaný výrobek byl použitelný. Navíc jeho cena byla cca 50 tis. Kč za kus, takže bylo logické hledat jinou technologii výroby.

3.3.2. Mezistupeň – kombinovaná kapilára z keramiky a PMMA

Významný mezistupeň při hledání schůdnější technologie výroby kapiláry je na obr. 3-6. Masivní keramika zde byla nahrazena tenkostěnnou keramickou trubičkou, zalisovanou do obrobku z plexi-skla po chemickém změkčení jeho vnitřního povrchu. U této varianty však

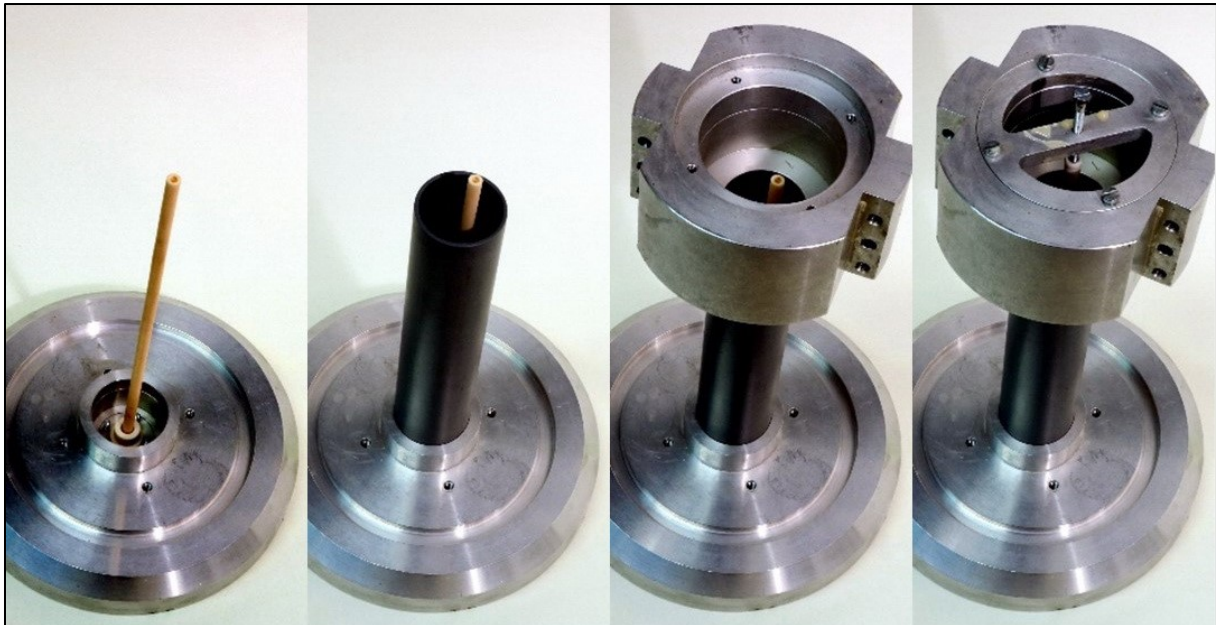


Obr. 3-6 Kombinovaná kapilára vyrobená z plexiskla, do kterého je zapuštěna tenkostěnná keramická trubička.

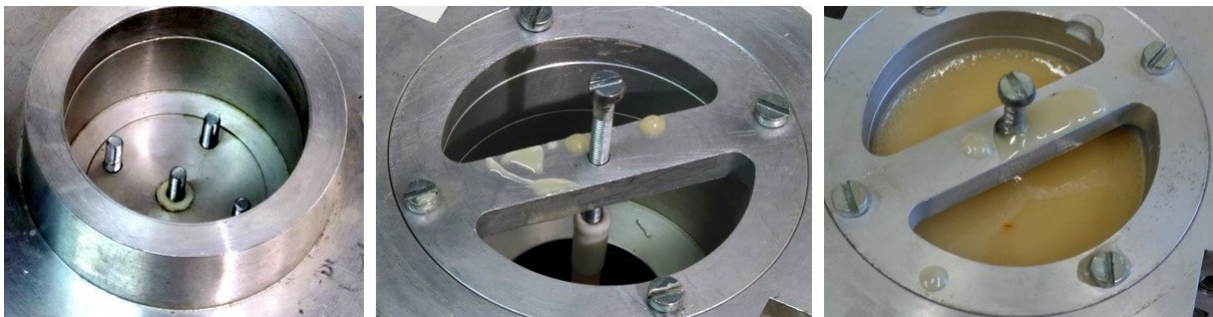
byla problematická právě technologie lisování, které nesmělo být ani příliš rychlé, kdy hrozilo přelomení keramiky, ani příliš pomalé, kdy zase docházelo k předčasnému ztuhnutí plexiskla ještě před dosažením konečné polohy keramické trubičky. Jenže i při úspěšném zalisování vznikaly ve změkčené vrstvě plexiskla dutiny a ty pak vedly k elektrickým průrazům viditelným jako černá místa. Nicméně, zkušenosti získané s touto variantou vedly k formulaci požadavků na vhodnější technologii výroby kombinované kapiláry analogické konstrukce.

3.3.3. Nová koncepce – keramika zalitá do polyuretanu

Hledala se odlévací hmota s dostatečnou mechanickou a elektrickou pevností a s nízkou změnou rozměrů během tuhnutí. Poslední kritérium bylo důležité proto, že výsledný produkt měl být stálým pevným spojením keramického jádra s odlitým pláštěm v celkové délce 200 až 400 mm. Zde bylo riziko, že se běžné odlévací hmoty během vytvrzování od keramického jádra odtrhnou, anebo je rozlomí buď již během tuhnutí, anebo následně při provozu, kdy je kapilára vystavena silným tlakovým rázům a jakékoli vnitřní pnutí může vést k její destrukci. Jako vyhovující se osvědčil speciální polyuretan F50 od firmy AXSON se 100% přídavkem minerálního plniva, dodávaný firmou ACR Czech s.r.o. z Mostu. Její pracovníci navrhli odlévací postup a první kapiláru nám sami úspěšně odlili. Při pečlivém dodržení jimi doporučeného postupu se úspěšnost odlévání kapiláry blíží 100%, materiálové náklady nejsou vyšší než 2000,-Kč, přičemž pracovní náročnost je odhadnuta na cca 3 hodiny pro dva odlévající pracovníky a cca 3 hodiny pro soustružníka provádějícího finální úpravy odlitku. Celkové náklady na jednu kapiláru nyní nepřesáhnou 5000,-Kč, tedy přibližně desetinu ceny původní masivní keramické kapiláry.

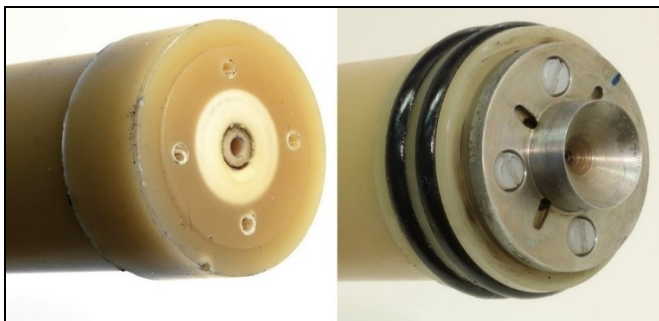


Obr. 3-7 Postupně zleva: spodní díl formy s nasunutou keramickou trubičkou s přitmelným keramickým nátrubkem na spodním konci, PVC trubka jako střední díl formy, rozebíratelný horní díl formy a fixační vložka se šroubem pro centrování a těsnění horního konce keramické trubičky.



Obr. 3-8 Detailní pohled do spodní části formy (vlevo), do horní části formy s připravenou utěsněnou trubičkou a na zalitou formu.

Na [obr. 3-7](#) je rozfázované skládání poslední varianty form pro konkrétní délku kapiláry 230 mm a na [obr. 3-8](#) jsou postupně detaily její základny a horního dílu před a po zalití polyuretanem. Ze dna formy vystupují závity pětice šroubků M3 zašroubovaných zespodu, z nichž čtyři obvodové slouží k odlití závitů pro budoucí uchycení zemní sdružené elektrody a střední, opatřený světlou pryžovou těsnicí podložkou je určen pro centrování a utěsnění spodní části keramické trubičky. Dále je na dně vidět mělké osazení pro centrování elektrody. Osazení ve vnitřní válcové ploše slouží jako doraz pro PVC trubku, tvořící střední část formy. Fixační vložka v horní části formy obsahuje centrální šroub pro jemné přitlačení, centrování a utěsnění keramické trubičky. Konečný vnější tvar obou konců vytvrzeného odlitku se upraví třískovým obráběním.



Obr. 3-9 Vlevo detail zemního konce kapiláry po odlití, vpravo kompletní zemní konec po vysoustružení drážek pro o-kroužky pro radiální těsnění a po montáži sdružené zemní elektrody s pomocí plastových šroubků.

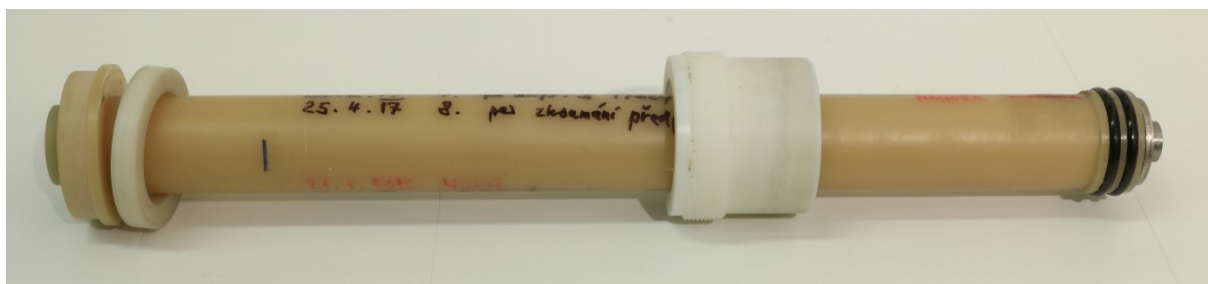
Na obr. 3-9 jsou detaily zemního konce kapiláry a) po odlití, b) po obrobení vnější válcové plochy a osazení těsnícími o-kroužky a zemní elektrodou.



Obr. 3-10 Detail vysokonapětového konce odlité kapiláry po odlití (vlevo) a po obrobení a osazení vnitřním o-kroužkem pro radiální těsnění (vpravo).

Na obr. 3-10 je vysokonapětový konec kapiláry, který obroben tak, aby vznikla rovinná čelní plocha s výstupkem pro vložení o-kroužku umožňujícího radiální těsnění při nasunutí na rozšířený nosič vysokonapětové elektrody, jak to odpovídá schematickému zobrazení na obr. 3-12, v jeho dolní části.

Kompletní kapilára délky 400 mm, která však byla již delší dobu používána, je na obr. 3-11, kde je též vidět převlečnou matici s podložkou, sloužící pro fixaci k izolační průchodce vysokonapětové elektrody.



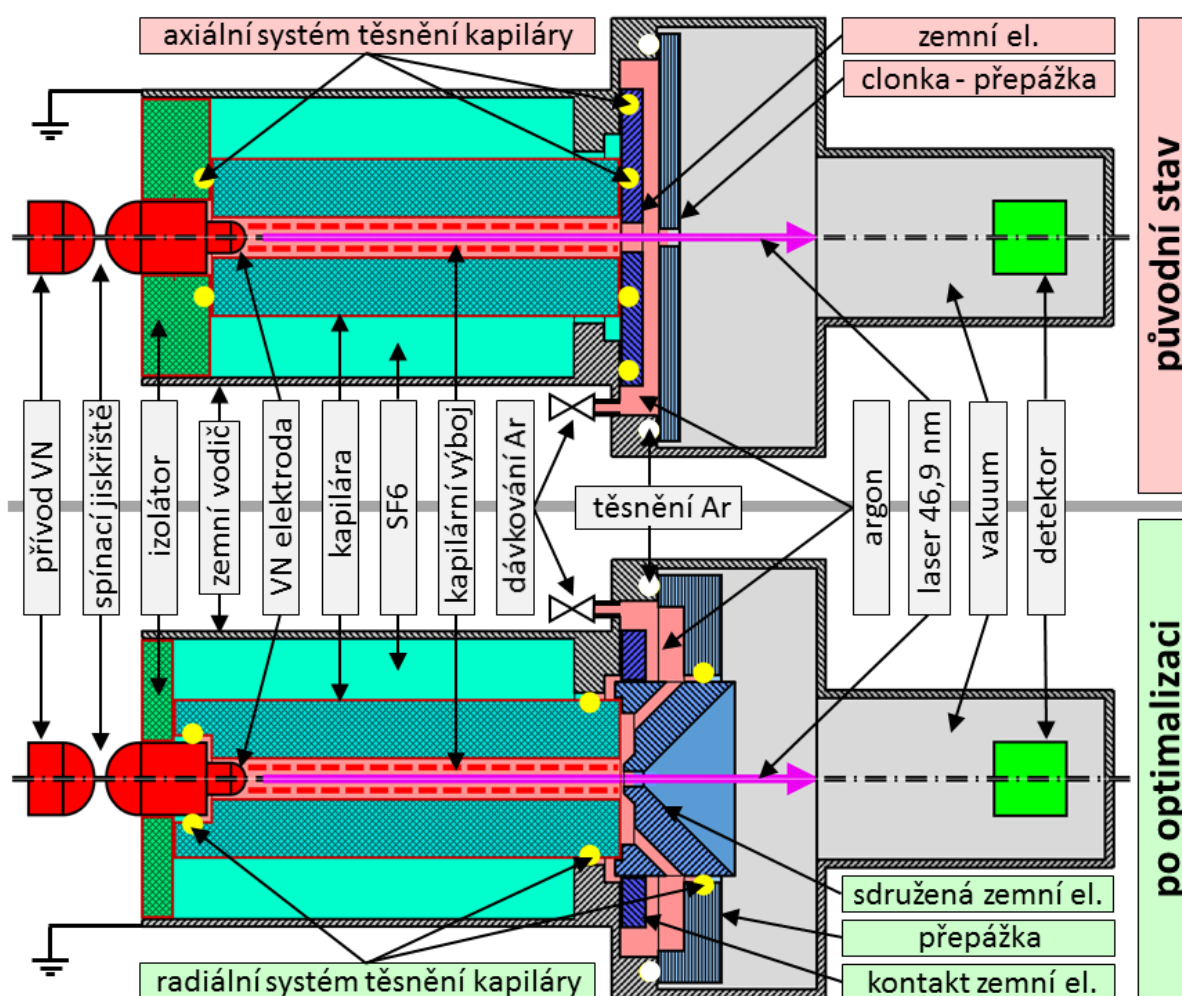
Obr. 3-11 Kompletní kombinovaná kapilára délky 400 mm s vnitřním průměrem 3 mm, vzniklá zalitím keramické trubičky do speciální polyuretanové pryskyřice.

Výroba kapiláry popsanou kombinovanou technologií je dobře reprodukovatelná, většina důležitých rozměrů je dána formou, takže již nezávisejí na individuální přesnosti obrábění a jsou stabilní pro všechny vyrobené kusy.

Jak bylo možno vyčíst z přehledu na obr. 3-1, změna koncepce kapiláry z celokeramické na kombinovanou umožnila odstranit náročnou, nákladnou a málo efektivní výrobu a nahradit ji nenáročnou technologií zaručující opakovaně velmi dobře vyhovující kvalitu.

3.4. Konstrukce – problematické napojení kapiláry

Nejvýznamnější konstrukční změny provedené v rámci optimalizace na aparatuře CAPEX se týkaly kapiláry a jejího bezprostřední okolí. Porovnání s původním stavem je schematicky znázorněno na obr. 3-12, kde nad sebou vidíme obě varianty, lišící se uspořádáním zemního (pravého) konce kapiláry a systémem těsnění kapiláry vůči dielektrické náplni SF₆ (žluté body představující těsnící o-kroužky).



Obr. 3-12 Schematické znázornění konstrukčních změn provedených na aparatuře CAPEX. Horní polovina obrázku zachycuje původní stav s růžovými popiskami a na spodní polovině je stav po optimalizaci, se světle zelenými popiskami. Části, jež zůstaly beze změny, mají bílé popisky.

3.4.1. Původní stav – zemní elektroda, clonka a axiální těsnění

A. Zemní elektroda a clonka

V horní polovině [obr. 3-12](#) vidíme zemní elektrodu (tmavě modrá), do níž se uzavírá kapilární výboj (červená čárkovaná čára) vycházející z VN elektrody (červená) a v jehož důsledku dochází ke generaci laserového pulzu (fialová), vycházejícího z dutiny v kapiláře (modrozelená) osovým směrem. Po průchodu otvorem v zemní elektrodě projde krátkou oblastí plnicí komory, kterou se do kapiláry napouští pracovní plyn Ar (světle červená) a dalším otvorem v clonce (světle modrá) se dostává do interakční vakuové komory (šedá), kde dopadá na detektor (žlutozelená). Principiálně bylo toto uspořádání sice funkční, ale jeho používání v praxi komplikovalo několik více či méně vážných slabín:

1. *Komplikované a nespolehlivé nastavování optické trasy*

Jak již bylo řečeno, aby vytvořený laserový svazek prošel k dalšímu využití do interakční vakuové komory, musel z kapiláry projít nejprve otvorem v zemní elektrodě a poté otvorem v clonce, oddělující oblast plněnou argonem od vakuové komory.

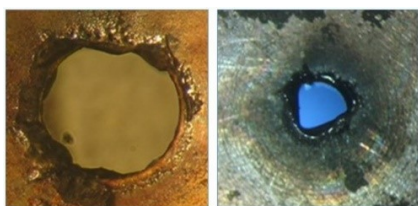
Montáž aparatury probíhala postupně zleva doprava dle [obr. 3-12](#), a tak bylo třeba zabezpečit přesnou (s chybou lepší než 0.1 mm) souosost zemní elektrody a clonky s ústím kapiláry. Proto měly fixační otvory (nezobrazeny) pro přišroubování zemní elektrody i clonky jistou vůli, umožňující tyto součástky vycentrovat. Jenže při ukládání dílů s menším otvorem na díly s otvorem větším nebyla při dané konstrukci kontrola souososti triviální, takže i při maximální pečlivosti se nám stávalo, že procházející laserový svazek byl zeslabován právě vlivem nedostatečné souososti zmíněných dílů. To vedlo k pracným opakovaným pokusům o lepší nastavení elektrody i clonky. Zcela spolehlivě nepomohlo ani zlepšení přesnosti nastavování pomocí minikamery, opticky fixující vzájemnou polohu jednotlivých dílů při montáži.

2. *Zanášení otvoru v zemní elektrodě struskou*

Během provozu docházelo k postupnému zanášení otvoru v zemní elektrodě – viz [obr. 3-13](#). vlevo, což vedlo ke zhoršování úrovně laserového signálu až k jeho úplné ztrátě. Vzhledem k nepřístupnosti otvoru v elektrodě bez demontáže clonky nebyla oprava této závady triviální a nepříjemný byl také fakt, že zhoršená funkce mohla mít i jiné příčiny, takže nikdy nebylo zcela zřejmé, jaká část aparatury vyžaduje opravu.

3. *Zanášení otvoru clonky struskou*

Podobně jako otvor v zemní elektrodě, zanášel se i otvor v clonce – viz [obr. 3-13](#) vpravo, což zpočátku vedlo jen ke změně tlaku argonu v kapiláře a bylo to možno částečně kompenzovat změnou nastavení dávkovacího ventilu, ale postupně docházelo až k úplnému ucpání otvoru a ke ztrátě laserového signálu. Také tuto závadu jsme obvykle nedokázali s jistotou přesně identifikovat. Protože clonka se zanášela rychleji než zemní elektroda, uvažovalo se o pročišťovacím trnu, který by se bez rozebírání aparatury navedl do otvoru v clonce a obnovil její průchodnost.



Obr. 3-13 Mikrofotografie otvorů v zemní elektrodě ϕ 2.5 mm (vlevo) a v clonce ϕ 1 mm (vpravo) zanesených struskou po 30-ti výstřelech.

4. Pohlcování laserového signálu při průchodu plnicí komůrkou

Z horní poloviny [obr. 3-12](#) vidíme, že než laserový svazek vstoupí do vakuového prostoru za clonkou, musí projít plnicí komůrkou naplněnou pracovním plynem – argonem o tlaku cca 50 Pa, v němž již není vybudována populační inverze, a tudíž pouze pohlcuje laserový signál. Tato dráha byla v rámci možností minimalizována na hodnotu cca 5 mm, takže zeslabení intenzity laseru o vlnové délce 47 nm vychází podle tabulek ([Henke, 1993](#)) na cca 75% původní intenzity.

B. Rigidní axiální těsnění

Původní, tzv. axiální systém těsnění kapiláry – viz horní část [obr. 3-12](#), spočíval v tom, že obě čelní plochy kapiláry dosedaly na těsnící o-kroužky nebo jiný druh těsnění a těsnost byla dosahována jednak přesnou výrobní tolerancí kapiláry a jednak silným přitlakem obou přírub, tedy přitlakem ve směru osy. Tento způsob nazýváme také rigidním, neboť kapilára je mezi přírubami pevně sevřená. Axiální systém těsnění měl dvě zásadní nevýhody a vzbuzoval jedno podezření:

1. Jeho spolehlivost závisela kromě síly dotažení přírub hlavně na přesném dodržení délkové výrobní tolerance kapiláry, což zejména při původním způsobu její výroby značně komplikovalo situaci.
2. Jak se později ukázalo, i velmi nepatrná netěsnost SF₆ silně ovlivňovala průběh kapilárního výboje, což vedlo ke snížení nebo úplné ztrátě energie generovaného XUV laseru. Není vyloučené, že netěsnosti se s časem zvětšovaly, protože příruba u vysokonapěťové části je z izolačního materiálu, který není zcela tvarově stabilní. Netěsnost kapiláry tak byla častou příčinou nefunkčnosti celého zařízení.
3. Silný axiální přitlak, který měl své opodstatnění ve snaze o co nejlepší těsnost, zřejmě vedl při každém výstřelu k přenesení prudkého mechanického rázu na kapiláru. To mohlo být jednou příčinou podélného praskání kapilár.

3.4.2. Optimalizovaná sdružená zemní elektroda a radiální těsnění

A. Sdružená zemní elektroda a clonka do jedné součástky

V dolní polovině [obr. 3-12](#) vidíme, že ze zemní elektrody a z clonky zbyla pouze dvě mezikruží, označená jako kontakt zemní elektrody (tmavomodrá) a přepážka (světle modrá), přičemž do těchto mezikruží zapadá speciálně tvarovaná sdružená zemní elektroda (modrá). Kontakt zemní elektrody slouží k jejímu uzemnění při zachování pohyblivosti v osovém směru a přepážka slouží k pohyblivému utěsnění rozhraní mezi argonem a vakuem pomocí o-kroužku. Výhody takového řešení jsou hned tři:

1. *žádné nastavování optické trasy*

Jelikož se z clonky a zemní elektrody stala jedna součástka, stačí, když při její montáži zajistíme souosost s ústím kapiláry. Jak jsme již viděli na [obr. 3-9](#), lze to s výhodou předem realizovat spojením sdružené elektrody s pláštěm kapiláry plastovými šroubky, přičemž centrování se osvědčilo pomocí přesného osazení vytvořeného na čelní ploše pláště kapiláry již při jejím odlévání, když negativní tvar tohoto osazení je na dosedací ploše sdružené elektrody.

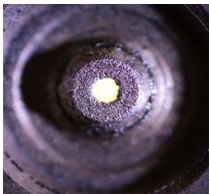
2. *krátká dráha laseru pohlcujícím prostředím*

Jelikož dráha laseru pohlcujícím prostředím v původní verzi vedla převážně mezi zemní elektrodou a clonkou, jejich spojením do jedné součástky klesne tato dráha na úroveň délky

centrálního kanálku ve sdružené elektrodě. Znamená to tedy prakticky odstranění zmíněného zeslabení, což se projeví jako cca 30 % nárůst energie generovaného XUV laseru.

3. „samočistící“ efekt

Přesto, nebo možná právě proto, že průměr otvoru ve sdružené elektrodě byl zvolen jen 0.5 mm oproti otvoru v původní zemní elektrodě, který měl průměr 2.5 mm, pozorovali jsme zajímavý efekt. Zatímco původní zemní elektroda i clonka se již po cca 30-ti výstřelech začínají uzavírat vlivem zvětšující se vrstvy nástřiku strusky, jak jsme viděli na obr. 3-13, sdružená elektroda je po 70-ti výstřelech stále dobře průchodná - obr. 3-14. Tento „samočistící“ efekt si vysvětlujeme vyšší rychlostí směsi strusky a plazmatu v úzkém otvoru elektrody, která zřejmě potlačuje její ulpívání na stěně. Na druhé straně je možné, že menší otvor je vystaven menšímu objemu strusky, přičemž zřejmě její většina bývala vystřelována z kapiláry poblíž její stěny, tedy na větším poloměru, takže se do menšího otvoru nyní téměř nedostane. Každopádně je zlepšení natolik výrazné, že při periodickém čištění kapiláry po několika stech výstřelů obvykle nevyžaduje sdružená elektroda téměř žádnou údržbu.



Obr. 3-14 Mikrografie otvoru ϕ 0.5 mm ve sdružené elektrodě po 70-ti výstřelech. Prakticky stejný obrázek jsme opakovaně viděli i po mnohonásobně větším počtu výstřelů.

B. Kluzné radiální těsnění

Ukázalo se, že pro daný účel je výhodnější radiální systém těsnění – viz spodní část obr. 3-12, převzatý ze systému těsnění rychlospojů zahradních hadic. Ten spočívá v tom, že těsnící o-kroužek zapuštěný ve válcové ploše jedné součásti těsní válcovou plochu druhé součásti, která je do ní vložena. V osové směru jsou obě součásti do jisté míry vzájemně pohyblivé při zachování těsnosti, dané přitlakem pouze ve směru rádiusu. Velikost přitlaku je tedy definována rozdílem průměrů obou válcových ploch a tloušťkou o-kroužku. Výhody radiálního systému těsnění kapiláry oproti axiálnímu systému jsou následující:

1. Volnější délková tolerance, takže požadovaná přesnost výroby kapiláry mohla být uvolněna z $\pm 0,05\text{mm}$ na $\pm 0,5\text{mm}$, což výrobu kapiláry i její montáž značně usnadnilo.
2. Vysoká spolehlivost těsnění. Po odzkoušení vhodných vzájemných rozměrů těsnících ploch bylo dosaženo prakticky 100% spolehlivosti těsnění a pominuly tak problémy s netěsností SF_6 , která vždy vedla k rapidnímu poklesu úrovně laseru.
3. Eliminace osových rázů. Jak je zřejmé z dolní části obr. 3-12, kapilára s připevněnou sdruženou elektrodou není nijak fixována v osové směru, tudíž při otřesech během výstřelu může snadno vyrovnávat mechanické osové rázy klouzáním v těsnících o-kroužcích. V praxi je fixována pouze proti úplnému vysunutí doprava plastovou převlečnou maticí v místě VN elektrody (na schématu není zakreslena).

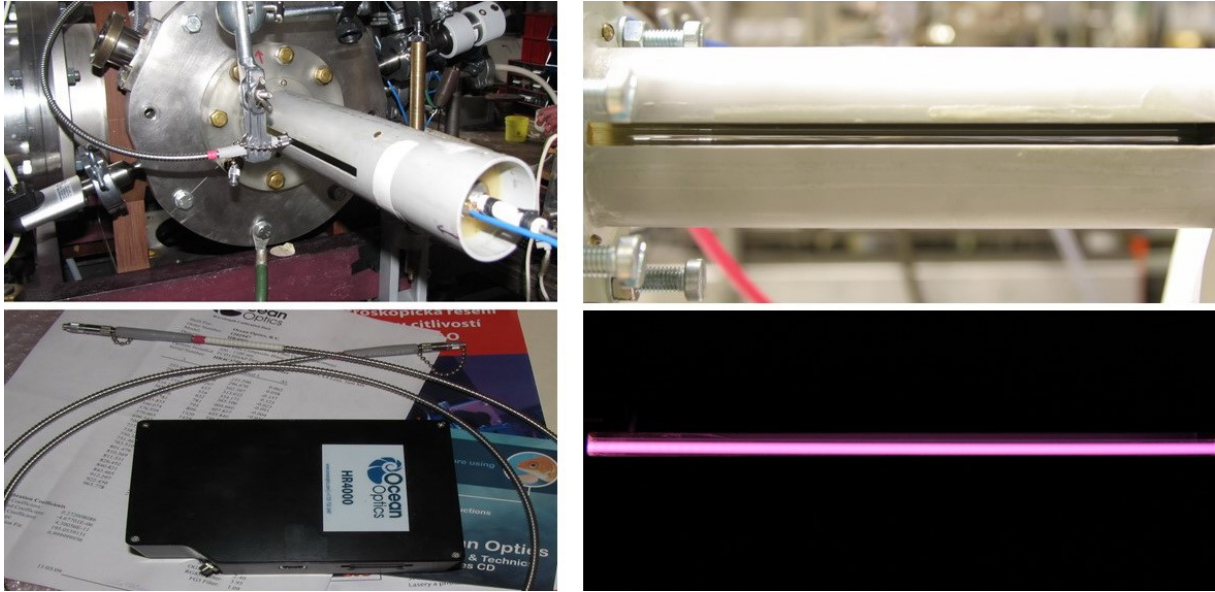
3.5. Režim generace laserujícího plazmatu - předionizace a proud hlavního výboje

3.5.1. Původní režim a jeho slabiny

V situaci, kdy bylo poprvé prokázáno laserování, byla používána předionizace proudem 10 A po dobu 5 μ s a proud hlavního výboje cca 30 kA. Tento režim vedl na naší aparatuře k častému praskání kapilár (průměrně po cca 50 výstřelech), ke zvýšené tvorbě strusky na vnitřní stěně kapiláry (nutnost čištění po cca 20 výstřelech) a ke znečištění generovaného XUV laseru částicemi rozžhavené strusky vyletujících z kapiláry (nutnost ochranné závěrky zadržující tyto částice po průchodu laseru). Právě při zkouškách ochranné závěrky jsme vyzorovali, že při výpadku předpulzu se spršky rozžhavených částic výrazně zintenzívnily, z čehož jsme usoudili, že nepřítomnost předpulzu by mohla zhoršovat i další nežádoucí efekty, na což je upozorňováno i v [Ben-Kish et al. \(2001\)](#). Proto jsme zavedli spouštění hlavního výboje až na základě skutečného zapálení předpulzu. To přineslo znatelné prodloužení provozuschopnosti kapiláry. Tato zkušenost se stala základem při úvahách o možnostech omezení tvorby strusky pomocí kvalitnější předionizace, a to i přesto, že v nám známé literatuře se za optimální předpulz považoval právě námi užívaný proud cca 10 A ([Niimi et al., 2002](#)).

3.5.2. Spektroskopické studium efektu předionizace

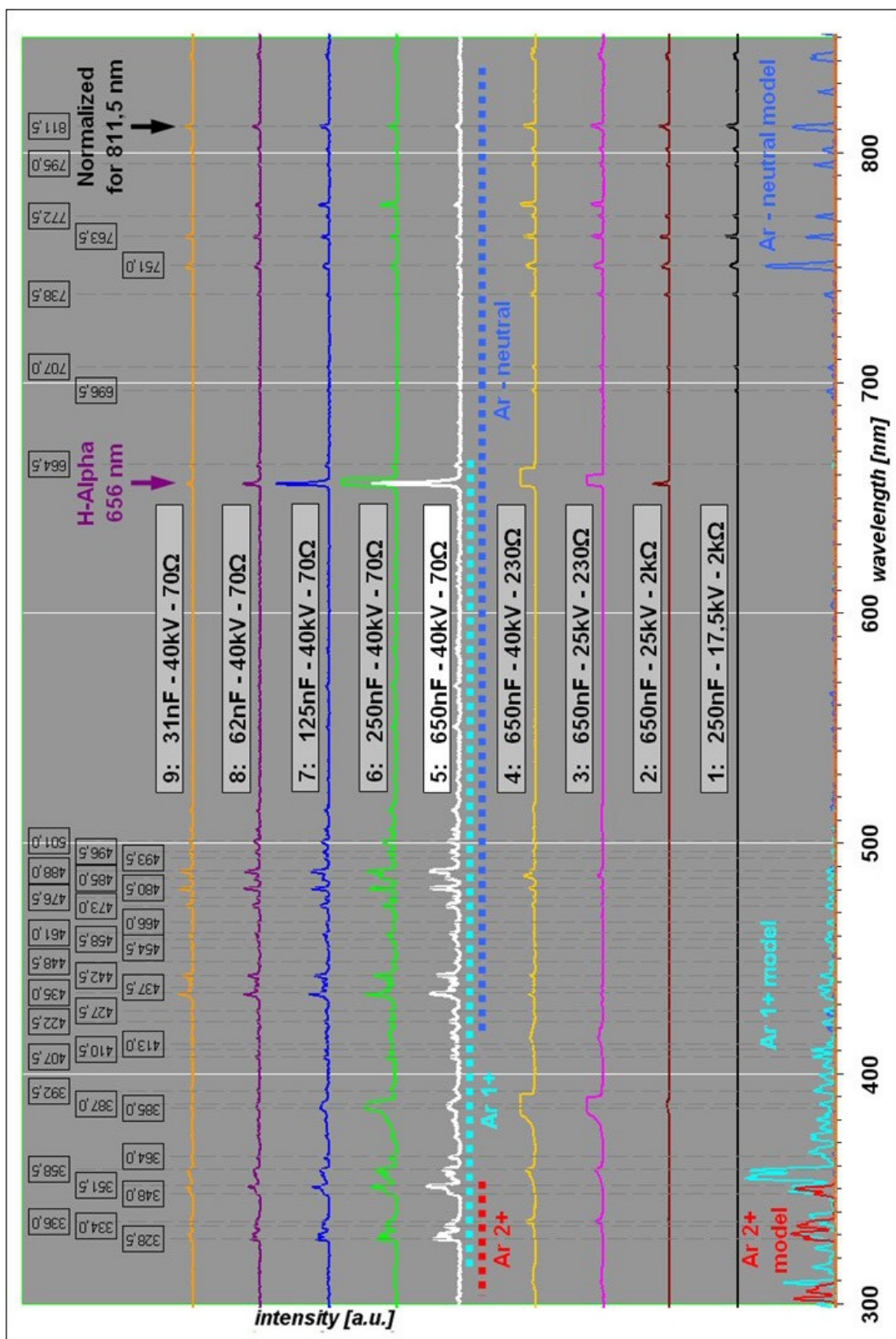
Abychom lépe porozuměli procesu předionizace, vyrobili jsme si průhledný křemenný model kapiláry – [obr. 3-15](#) nahoře vlevo, který umožňoval studium efektu předionizačního proudu pomocí spektroskopu pracujícího v oblasti viditelného (VIS), infračerveného (IR) a blízkého ultrafialového (UV) oboru spektra, konkrétně, konkrétně USB UV, VIS, IR přehledový spektroskop Ocean Optics HR4000 – vlevo dole na [obr. 3-15](#). Na pravé straně [obr. 3-15](#) je nahoře v detailu zobrazen výřez v plastovém plášti křemenné kapiláry, kterým lze přímo pozorovat výboj předpulzu – dole. Zajímalo nás, při jakých parametrech předpulzu budeme pozorovat významný podíl alespoň jedenkrát ionizovaných argonových iontů. Pro aplikaci extrémních proudů až 600 A po dobu několika desítek μ s, jsme byli nuceni upravit obvod předpulzu speciálně pro tento účel. Nabíjecí kondenzátor 30 nF jsme nahradili kapacitou 650 nF, sériový vodní odpor jsme snížili z 1000 Ω na cca 70 Ω a elektronické spínání pomocí tyatronu jsme nahradili mechanicky spínaným jiskřištěm. Zdroj nabíjecího napětí 16 kV jsme nahradili zdrojem, nastavitelným až do 40 kV.



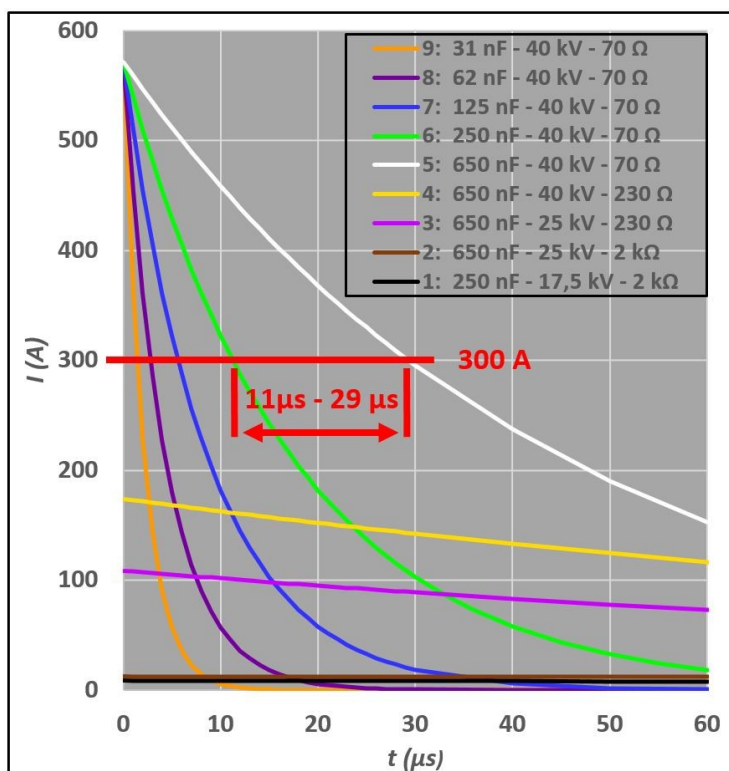
Obr. 3-15 Vlevo: Uspořádání experimentu s křemenným modelem kapiláry pro spektroskopické studium předionizace (**nahore**) s pomocí UV-VIS-IR spektroskopu Ocean Optics HR4000 (**dole**).

Vpravo: Pozorovací výřez v plášti kapiláry (**nahore**), fotografie efektu předpulzu ve viditelném světle (**dole**).

Na [obr. 3-16](#) vidíme spektroskopickou odezvu různých režimů předionizace, jejichž průběhy proudu jsou odpovídajícími barvami vyznačeny na [obr. 3-17](#). Porovnáním naměřených spekter s modelovými spektry v dolní části (resp. vpravo vzhledem k orientaci na výšku), můžeme konstatovat, že významný podíl alespoň jedenkrát ionizovaného Ar se objevuje až u spektra č. 5 (bílá čára), tj. při počátečním proudu téměř 600 A. Všechna spektra pod ním, odpovídající menším proudům svědčí o podstatně nižší ionizaci. Pokud zachováme konstantní počáteční hodnotu proudu 600 A a snižujeme kapacitu vybíjecího kondenzátoru, čímž díky rychlejšímu útlumu vlastně zkracujeme dobu expozice, dostaneme při 250 nF zelené spektrum, které se od bílého liší jen nepatrně, ale další zkracování expozice (modré, fialové a okrové spektrum) již svědčí o podstatně nižší míře ionizace. Tyto výsledky naznačují, že pro efektivní předionizaci by úroveň předionizačního proudu měla být udržována kolem hodnoty 300 A po dobu cca od 10 μ s do 30 μ s.



Obr. 3-16 Soubor časově integrovaných UV-VIS-IR spekter buzených při předionizaci argonu o tlaku 50 Pa v křemenném modelu kapiláry systému CAPEX pro různé parametry předpulzu: Vybíjecí kapacita 31 nF až 650 nF, nabíjecí napětí 17.5 kV až 40 kV, omezující odpor 70 Ω až 2 k Ω . Pro dosažení srovnatelných měřítek všech spekter byla spektra normalizována na jednotnou výšku čáry 811.5 nm neutrálního Ar, jehož přítomnost se dá předpokládat při všech zkoušených režimech. Spektrometr HR 4000 high-resolution (Ocean Optics) Ve spodní části jsou modelová spektra neutrálního, jedenkrát a dvakrát ionizovaného Ar spočítaná pomocí Interaktivního systému pro interpretaci atomových spekter (P7 - Straus et al., 2005).



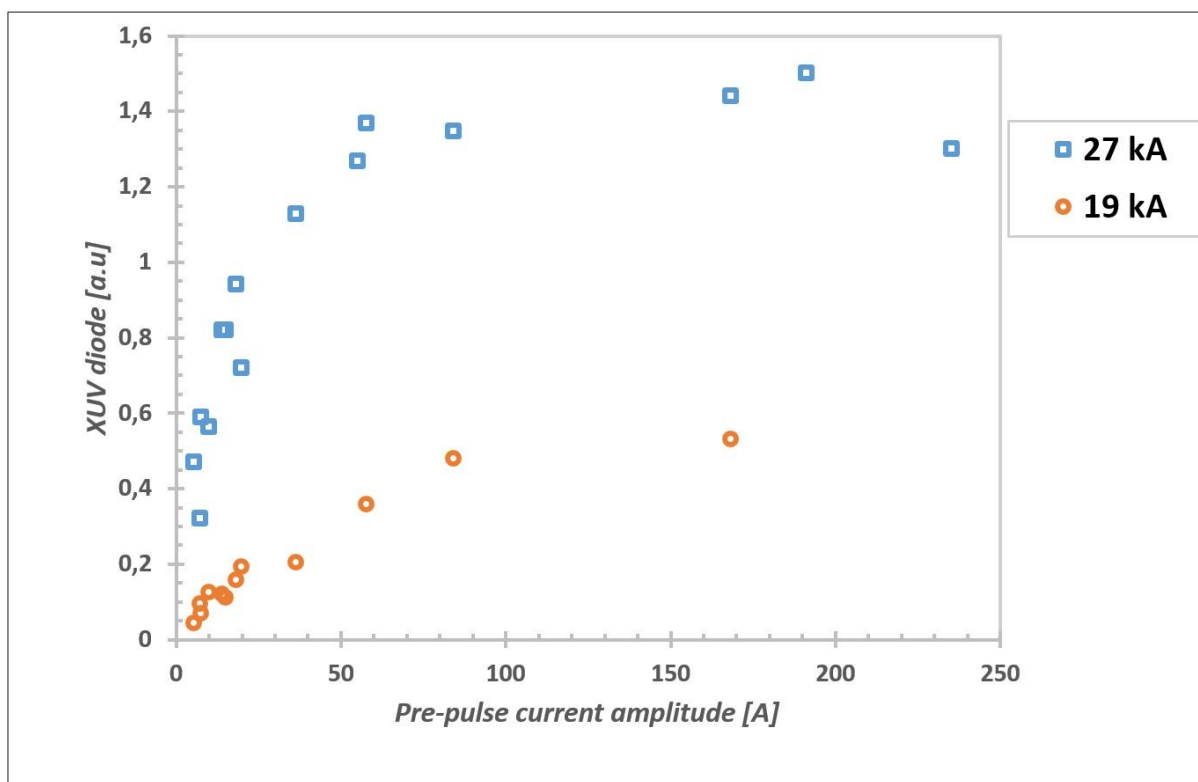
Obr. 3-17 Časové průběhy proudů předpulzu použité pro spektroskopické studium předpulzu na obr. 3-16

3.5.3. Multiparametrická optimalizace energie XUV laseru CAPEX

Při praktickém ověřování spektroskopicky doporučeného režimu předionizace byla sledována energie laserového pulzu pro různé časové průběhy předpulzu dané volbou součástek v obvodu předpulzu na obr. 2-2. Konkrétně jsme měnili sériový vodní odpor (100 Ω , 480 Ω a 1250 Ω), vybíjecí kapacitu (650 nF, 154 nF a 30 nF) a napětí zdroje předpulzu (od 7,9 kV do 32 kV). Pro každou situaci jsme průběžně optimalizovali počáteční tlak Ar v kapiláře a expoziční dobu předpulzu. Orientaci nám usnadňovaly numerické simulace (P2 - Hübner et al., 2012), čímž se množství potřebných měření zredukovalo na únosnou úroveň. Dbali také na to, aby vakuová XUV fotodioda nebyla přesycená a aby všechny sady měření byly pokud možno souměřitelné, tj. provedené při konstantní kombinaci tlumících Al filtrů. Výsledky této multiparametrické optimalizace jsou ve zjednodušené, zjednodušené a názorné podobě prezentovány na obr. 3-18. Redukování spočívalo ve výběru experimentů, jejichž hlavní výbojový proud nevybočoval ze zvoleného intervalu a zjednodušení spočívá ve volbě nezávisle proměnné: Zatímco ve skutečnosti jsme měřili při různých úrovních exponenciálně tlumeného proudu, jak to odpovídá vybíjení kondenzátoru, pro prezentaci výsledků jsme jako nezávisle proměnnou zvolili konečnou hodnotu proudu předpulzu, při které končí předionizace a začíná hlavní výboj. Jelikož konečná hodnota proudu předpulzu mohla být dosažena více způsoby při různém útlumu, vybírali jsme vždy tu variantu, která vedla k vyššímu signálu laseru. Všechna popsaná měření byla provedena pro dvě střední hodnoty proudu hlavního výboje, 27 kA (modré čtverečky) a 19 kA (oranžové kroužky).

Ukázalo se, že pro maximalizaci signálu XUV fotodiody je pro obě úrovně hlavního výboje výhodný tvrdší zdroj předpulzu. Vidíme, že cca do 80 A signál laseru prudce roste a nad 100 A

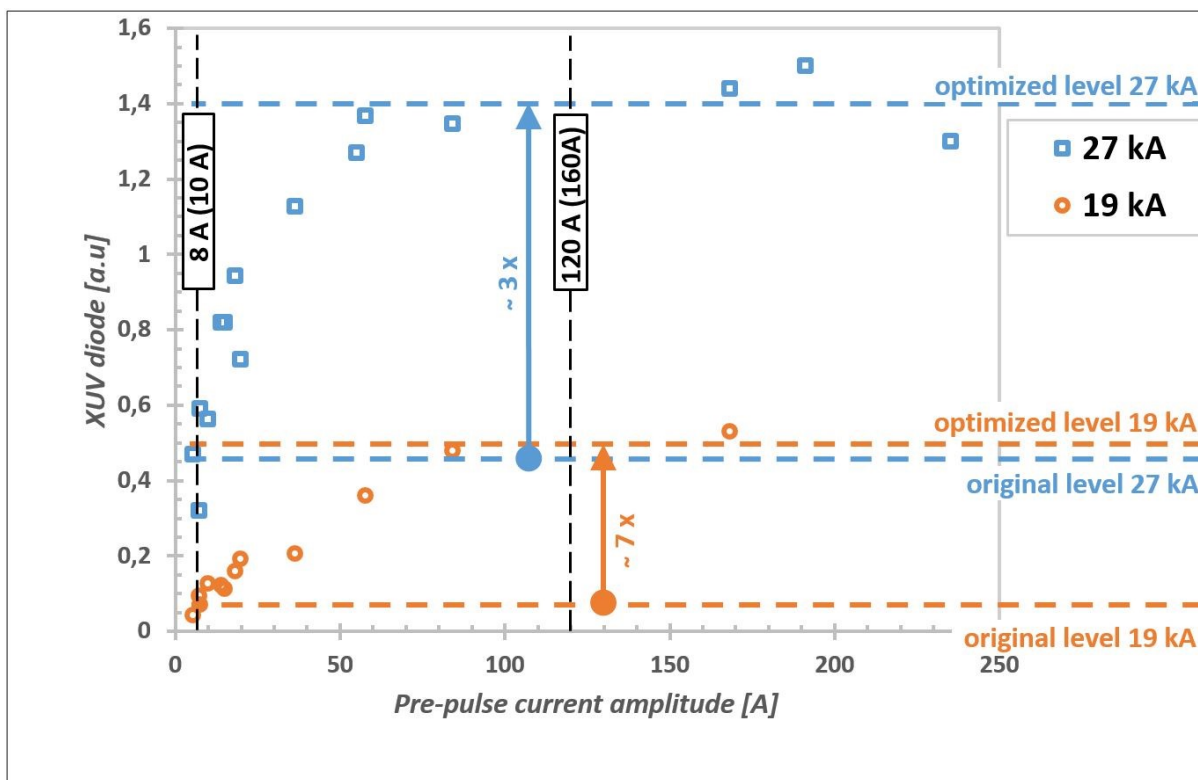
se jeho růst zpomaluje a v případně vyššího hlavního proudu opět klesá. Proto jsme jako optimální hodnotu předpulzu zvolili konečný proud cca 120 A.



Obr. 3-18 Intenzita XUV laseru CAPEX v závislosti na konečné hodnotě předionizačního proudu měřená XUV fotodiodou s Al filtrem tl. 1.2 μm + 0.8 μm po multiparametrické optimalizaci provedené pro dvě úrovně amplitudy proudu hlavního výboje – 19 kA a 27 kA.

3.5.4. Optimalizovaný režim

Na obr. 3-19 jsou pro identická experimentální data z obr. 3-18 vyznačeny proporce, v jakých se tato data mění při změně předpulzu z původní hodnoty 8 A na optimalizovanou hodnotu 120 A. Vidíme, že původní úroveň laserového signálu měřená XUV diodou pro vyšší hlavní proud (modrá) a pro doposud standardní hodnotu předpulzu 8 A (odpovídá počáteční hodnotě 10 A) odpovídá zhruba stejnému signálu, jaký byl dosažen pro nižší hlavní proud (oranžová), ovšem s vyšším předpulzem – cca 120 A (počáteční hodnota 160 A). Přitom ponechání hlavního proudu na původní vyšší úrovni vede s vyšším předpulzem k signálu ještě cca 3 x většímu. Toto nečekané zjištění tedy na jednu stranu umožňuje dosahovat stejné energie laserového pulzu s nižším hlavním proudem a šetřit tak aparaturu a na druhé straně při stejném hlavním proudu máme k dispozici 3 x větší laserový signál. Jak také vidíme, optimalizovaný režim se sníženým hlavním proudem 19 kA vede dokonce k cca 7-mi násobnému zvýšení signálu laseru oproti situaci s původním předpulzem. Tento režim se velmi dobře prakticky osvědčil zejména výrazným potlačením degradace kapiláry. Silný, i když nižší protektivní vliv optimalizovaného předpulzu 120 A jsme pozorovali i při vyšším hlavním proudu 27 kA.



Obr. 3-19 Experimentální data z obr. 3-18 s vyznačenými proporcemi, jak se liší signál XUV diody pro původní (8 A) a optimalizovanou (120 A) hodnotu předpulzu.

Stav po optimalizaci:

Jako optimální předpulz pro optimalizovanou aparaturu CAPEX jsme stanovili předionizaci s následujícími parametry obvodu předpulzu definovanými na obr. 2-2: vybíjecí kapacita 650 nF nabíjená zdrojem předpulzu na 16 kV a sériový vodní odpor ~100 Ω. Vhodná expozice byla stanovena na 20 μs, takže počáteční proud je cca 160 A a hlavní proud se spíná při aktuálním proudu předpulzu cca 120 A.

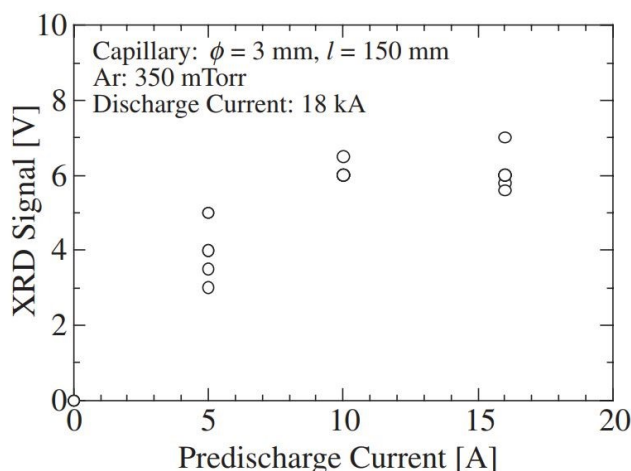
Tyto parametry jsou použitelné pro obě úrovně proudu hlavního výboje – 19 kA a 27 kA. Počáteční tlak Ar je třeba přesně optimalizovat v závislosti na konkrétním stavu aparatury, zejména kapiláry a na přesné hodnotě skutečného proudu hlavního výboje. Všechny optimalizované parametry předpulzu, jsou uvedeny v tab. 5-1.

Tab. 5-1 Kompletní optimalizované parametry pro dvě úrovně amplitudy proudu hlavního výboje.

Hlavní proud	Poč. tlak Ar		Parametry předpulzu					
			Kapacita	Napětí	Odpor	Max.proud	Expozice	Min.proud
(kA)	(Pa)	(Torr)	(nF)	(kV)	(Ω)	(A)	(μs)	(A)
19	31,0	0,233	650	16	100	160	20	120
27	42,0	0,315						

3.5.5. Srovnání s literaturou

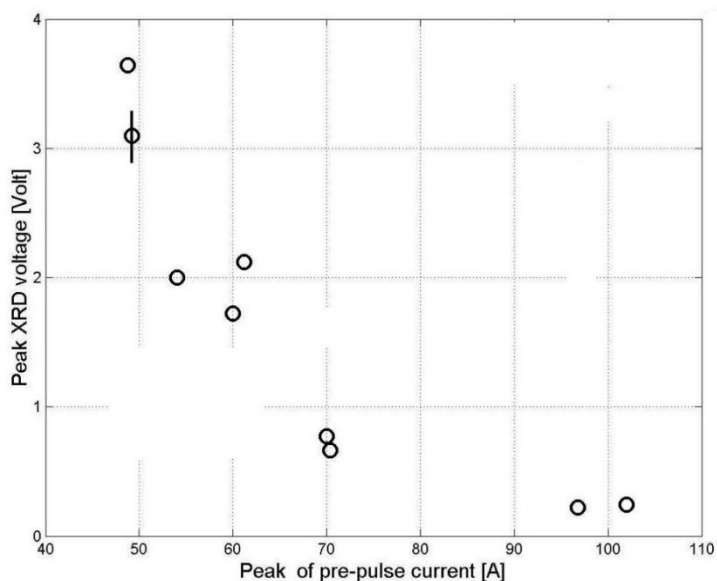
Již při prvním představení Roccova laseru (Rocca et al., 1994) byla zmíněna předionizace Ar v kapiláře proudem 10 A po dobu několika μs . Vliv předpulzu na stabilitu pinčujícího plazmatu je zdůrazněn v Ben-Kish et al. (2001) s tím, že proud předpulzu 50 A vede k lepší stabilitě než proud 5 A. Přímým fotografováním kapilárního výboje ve skleněné kapiláře bylo ukázáno v Niimi et al. (2002), že předpulz 10 A vede k odtržení pinčujícího plazmatu od stěny kapiláry a k vytvoření úzkého osového sloupce, zatímco v situaci bez předpulzu výboj hoří víceméně v celém objemu kapiláry. Zároveň byla naměřena první závislost velikosti signálu XUV diody na velikosti předpulzu převzatá na obr. 3-20, která je přesněji popsána v Hayashi et al. (2003), kde byla navíc studována stabilita výboje předpulzu v jeho průběhu a na základě toho byl určován vhodný okamžik pro spuštění hlavního výboje. Závislost na obr. 3-20 byla změřena tak, že díky exponenciálnímu útlumu proudu předpulzu o počáteční hodnotě 20 A bylo jednotlivých hodnot proudu dosaženo prostě příslušným načasováním počátku hlavního výboje. Na rozdíl od nás tedy expoziční čas nebyl konstantní, ale pro 16 A byl 10 μs , pro 10 A: 20 μs a pro 5 A: 35 μs . To může být vysvětlením mírnějšího nárůstu signálu laseru s proudem, než jsme pozorovali my při průběžné optimalizaci všech parametrů, tedy i expoziční doby. Ze zkušenosti víme, že další příčinou rozdílných výsledků může být počáteční tlak Ar. Z tab. 5-1 vidíme, že pro podobný hlavní proud 19 kA jsme jako optimální stanovili 31 Pa (233 mTorrů), zatímco v Hayashi et al. (2003) - viz obr. 3-20 používali tlak 46,7 kPa (350 mTorr). To znamená, že závislost na obr. 3-20 vlastně není v rozporu z našimi výsledky uvedenými na obr. 3-18.



Obr. 3-20 Vztah mezi velikostí signálu laseru a proudem předpulzu v čase zapnutí hlavního výboje. (Hayashi et al., 2003)

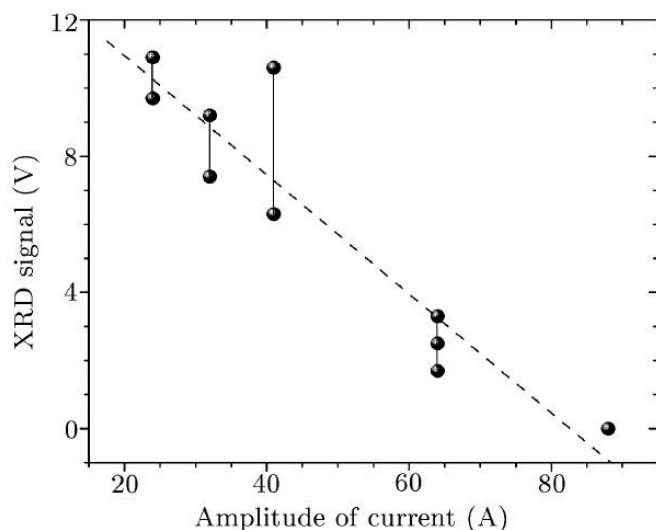
Nicméně, na obr. 3-21 vidíme průběh závislosti intenzity laseru na proudem předpulzu převzatý z Shuker, et al., (2006), který je zcela opačný k průběhu který jsme naměřili my (obr. 3-18). Je sice pravda že náš hlavní výbojový proud je téměř poloviční a průměr naší kapiláry je 3 mm oproti jejich 5 mm, ale i tak je zvláštní, že se charakter závislosti tak výrazně liší. Vliv rozdílného hlavního proudu i průměru kapiláry však nelze vyloučit a kromě toho může být příčina ve skutečnosti, že v Shuker, et al., (2006) používali pevnou expoziční dobu předpulzu 6 μs , zatímco my jsme ji průběžně optimalizovali, i když pro celou proudovou závislost nakonec vycházela konstantní – 20 μs . Podobně jsme se neomezovali na konstantní počáteční tlak Ar, ale průběžně jsme jej optimalizovali, i když nám také nám pro celou proudovou závislost vycházela tatáž hodnota. Také se nedá vyloučit, že příčinou opačného průběhu může být i naše konstrukce sdružené zemní elektrody a clonky, která zřejmě více omezuje axiální

proudění Ar ven z kapiláry při intenzivním předpulzu, což Shuker uvádí jako možnou příčinu poklesu intenzity laseru s rostoucím předpulzem. Každopádně můžeme tvrdit, že tento efekt se v naší aparatuře výrazněji neuplatňuje, alespoň ne pro proudy předpulzu do 200 A.



Obr 5-21 Efekt špičkové hodnoty předpulzu na intenzitu laseru pro kapiláru ϕ 5 mm délky 165 mm, dobu expozice předpulzu 6 μ s, hlavní výbojový proud 52 kA a počáteční tlak Ar 500 mTorr. (Shuker et al., 2006)

Doporučení uvedené v Shuker, et al., (2006), používat pro předpulz proud do hodnoty 50 A, odvozené z převzatého obr. 3-21, bylo přijímáno dalšími autory (Luan et al., 2007), kteří je ještě doplnili vlastními měřeními – viz obr. 3-22, ze kterých usoudili, že předpulz má být 20 A případně ještě o trochu méně. Příčinu zcela opačné závislosti než jsme naměřili my (obr. 3-18) můžeme vidět v odlišnosti našich měření v tom, že jsme prováděli průběžnou optimalizaci tlaku a doby expozice předpulzu a přitom jsme se dopracovali k poněkud odlišným hodnotám tlaku - 42 Pa, oproti 28 Pa a expozice - 20 μ s, oproti „několik μ s“.



Obr. 3-22 Naměřená intenzita laseru jako funkce amplitudy předpulzu. Počáteční tlak Ar 28 Pa, délka kapiláry 200 mm a amplituda hlavního proudu 27 kA. Doba expozice předpulzu „několik μ s“. (Luan et al., 2006)

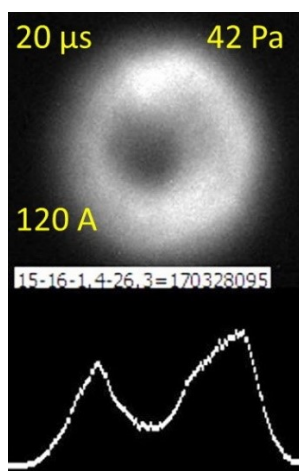
Nezbývá než konstatovat, že výsledek naší multiparametrické optimalizace energie laseru CAPEX se s některými autory dostává do rozporů, jejichž možná zdůvodnění byla v předcházejícím textu naznačena.

3.5.6. Možnosti ovlivňování profilu laserového svazku

Již při prvních experimentech s luminiscenčním stínítkem, kdy jsme zaznamenávali různé profily svazku během optimalizace tlaku Ar, začínalo být zřejmé, že profil XUV laserového svazku nemusí být výhradně jen dutý, jak bylo tehdy celkem všeobecně přijímáno.

A. Profily XUV laseru v režimu maximální energie

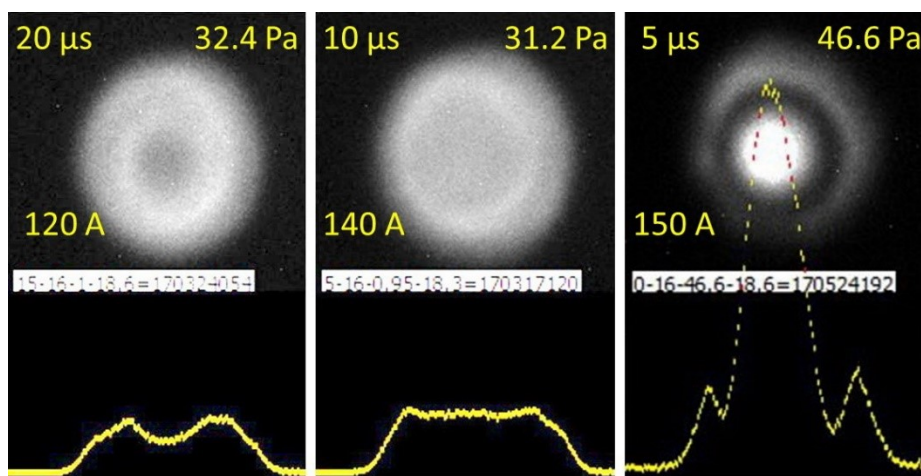
Na obr. 3-23 je obvyklý dutý profil pozorovaný při nejvyšší energii XUV laseru, konkrétně při amplitudě proudu hlavního výboje 26,3 kA, V tomto režimu lze sice také dosáhnout plného profilu, ale s podstatně nižší celkovou energií laserového pulzu.



Obr. 3-23 Obvyklý dutý profil XUV laseru při **nejvyšší energii** - proud hlavního výboje **26,3 kA**, tlak Ar 42 Pa, proud předpulzu - max.: 160 A, min.: 120 A, trvání 20 μ s.

B. Profily XUV laseru v režimu střední energie

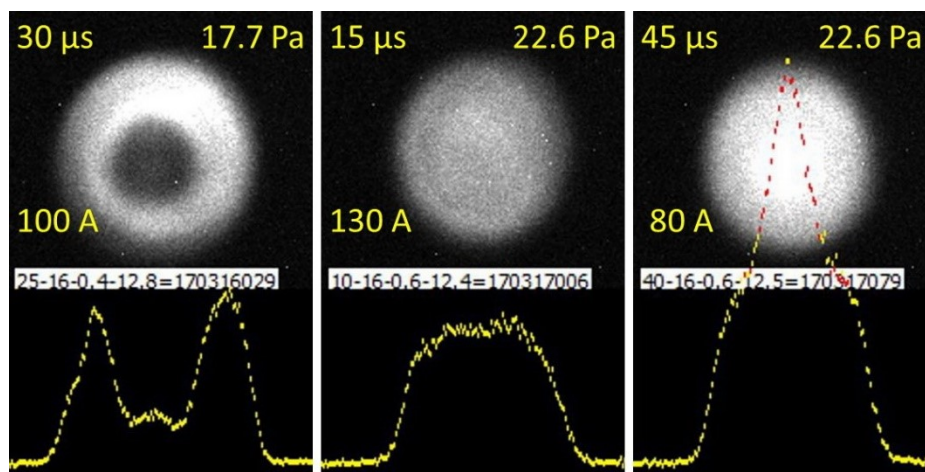
Při střední energii laseru, tj. při amplitudě proudu hlavního výboje kolem 19 kA, je více možností. Na obr. 3-24 je kromě dutého profilu (vlevo) také plný profil (uprostřed) a ostrý profil s náznakem mezikruží (vpravo).



Obr. 3-24 Charakteristické profily v režimu **střední energie laseru** pro vybrané hodnoty parametrů předpulzu a tlaku, při konstantní amplitudě proudu hlavního výboje - cca 19 kA a maximálním proudem předpulzu - 160 A.

C. Profily XUV laseru v režimu nízké energie

Ještě větší variabilita je v režimu nízké energie, při hlavním proudu ostřejší profil lze docílit dalším snížením hlavního proudu na cca 13 kA - viz obr. 3-25. Z obvyklého profilu, který dostaneme při optimalizaci tlaku, expozice a velikosti proudu předpulzu, můžeme zvýšením tlaku a zkrácením expozice předpulzu profil vyplnit a pak prodloužením expozice a tím snížením konečné hodnoty proudu předpulzu získáme ostré maximum intenzity uprostřed laserové stopy.



Obr. 3-25 Charakteristické profily v režimu nízké energie laseru pro vybrané hodnoty parametrů předpulzu a tlaku, při konstantní amplitudě proudu hlavního výboje - cca 13 kA a maximálním proudu předpulzu - 160 A.

D. Volba vhodného profilu

Podle uvažované konkrétní aplikace je tedy možné vybrat nejvhodnější profil, ovšem v závislosti na požadované energii laserového pulzu. Nejprve je tedy třeba si ujasnit, jakou budeme potřebovat energii a potom můžeme z uvedených možností vybírat profil. Rovněž je třeba uvážit, jestli chceme XUV laser používat k expozici primárním svazkem, kde nás bude přímo zajímat jeho profil anebo jestli jej budeme nejprve fokusovat. V případě dalšího zaostřování např. pomocí multivrstvého kulového zrcadla může být ostrý laserový svazek na jednu stranu výhodnější z hlediska menšího uplatnění sférické vady, ale na druhou stranu je u něho třeba počítat se zvýšenou erozí povrchu zrcadla, protože při stejném uspořádání je zrcadlo v místě ostrého maxima vystaveno energetickému zatížení o mnohonásobně větší plošné hustotě energie. Je tedy na zvážení, jestli z tohoto důvodu v tomto konkrétním případě nevolit raději homogenní plný profil, který bude zrcadlo naopak šetřit.

Otázkou zůstává, proč se ostré maximum nedaří získat při vyšších proudech hlavního výboje, tedy při vyšší energii laseru. Domníváme se, že to může souviset s průměrem kapiláry, ale ten jsme již z časových důvodů nezkoušeli měnit.

3.6. Výsledné technické parametry laseru CAPEX

Dlouhodobé používání aparatury v novém režimu prokázalo výrazné potlačení tvorby strusky i její vystřelování z kapiláry. Zřejmě také v souvislosti se změnou systému těsnění z rigidního axiálního na kluzné radiální přestaly kapiláry praskat, což bylo spolehlivě prověřeno i při dvojnásobném proudu hlavního výboje.

Technické parametry laseru CAPEX po optimalizaci jsou pro tři vybrané režimy uvedeny v tab. 5-2.

Tab 5-2 Technické parametry XUV laseru CAPEX s korundovou kapilárou délky 400 mm, vnitřního průměru 3 mm s jednotným počátečním proudem předpulzu 160 A a čtvrtperiodou hlavního proudu cca 60 ns. Vlnová délka 46.9 nm, délka pulzu cca 1.5 ns, divergence cca 2 mrad, interval mezi pulzy 20-40 s.

Energetický režim	Hlavní proud (kA)	Char. svazku		Poč. tlak		Předpulz		Životnost kapiláry (Min. poč. výstřelů)	Potřeba servisu
		Energie (μ J)	Profil	Ar		Expozice (μ s)	Min.proud (A)		
				(Pa)	(Torr)				
MAXIMÁLNÍ	27	75	DUTÝ	42,0	0,315	20	120	3000	300
STŘEDNÍ	19	25	DUTÝ	32,4	0,243	20	120	10000	1000
			PLNÝ	31,2	0,234	10	140		
			OSTRÝ	46,6	0,350	5	150		
NÍZKÝ	13	15	DUTÝ	17,7	0,133	30	100	30000	3000
			PLNÝ	22,6	0,170	15	130		
			OSTRÝ	22,6	0,170	45	80		

3.7. Shrnutí optimalizace

Deset negativních atributů prvního funkčního stádia aparatury CAPEX, uvedených v růžových obdélnících na obr. 3-1, představovalo komplex vzájemně provázaných problémů vyúsťující do téměř neúnosného souboru pěti „užitných“ vlastností, uvedených v pěti kruzích ve spodní části téhož obrázku: Vysoké náklady na jeden výstřel cca 1000,-Kč, nízká a kolísající energie laserového pulzu, nepřijatelná životnost kapiláry max. 50 výstřelů, potřeba údržby téměř po každých 20-ti výstřelech a nutnost ochranné závěrky proti silnému znečištění laseru vyletujícím částicemi strusky. V průběhu hledání příčin problémů a cest k jejich řešení se překvapivě ukázalo, že vhodná volba řešení jednoho dílčího problému vedla zároveň k vyřešení jiného, zdánlivě nesouvisejícího problému. Taková situace se vyskytla dokonce třikrát:

1. Náhrada zemní elektrody a clonky jednou sdruženou elektrodou se dělala z důvodu komplikovaného nastavování jejich sousostí a částečně také kvůli snížení absorpce laseru, a nečekaným důsledkem bylo zjištění, že se přestala zanášet struskou.
2. Změna systému těsnění z axiálního na radiální se dělala z důvodu nepřiměřených výrobních tolerancí vyžadovaných axiálním systémem, a z toho vyplývajících častých netěsností SF₆, ale nakonec se ukázalo, že nejspíš hlavně v důsledku této změny kapiláry přestaly praskat.
3. Detailní studium předpulzu motivované zpočátku nejasnou souvislostí se struskou vedlo ke zkoušení mnohonásobně většího proudu předpulzu, který kromě potlačení tvorby strusky

překvapivě zvýšil energii laseru do té míry, že proud hlavního výboje mohl být naopak snížen, čímž se nejpřímější cestou snížily nároky na celou aparaturu.

Výsledkem celého optimalizačního procesu je převrácení deseti negativních atributů původního řešení (růžové obdélníky) na [obr. 3-1](#) do stejného počtu pozitivních atributů výsledných řešení (zelené obdélníky), které vyústily do velmi přijatelných užitných vlastností uvedených v kroužcích v horní části [obr. 3-1](#):

Náklady na 1 výstřel klesly 1000x, energie laseru se výrazně stabilizovala a dosahuje vyšší úrovně, životnost kapiláry stoupla minimálně 200x a údržba se nesrovnatelně zjednodušila, přičemž její potřeba poklesla nejméně 50 x. Podařilo se tak splnit základní předpoklady pro praktické uplatnění laserového zdroje CAPEX, což bylo též prokázáno realizací řady aplikací popsaných v kapitole [Aplikace laseru CAPEX \(5\)](#).

4. Diagnostické a aplikační pomůcky a přístroje

V závislosti na postupně vznikajících požadavcích byly v průběhu optimalizace aparatury CAPEX průběžně vyvíjeny a zdokonalovány i potřebné speciální pomůcky usnadňující diagnostiku, nastavování aparatury a její provoz v nově vznikajících situacích.

4.1. Interaktivní systém pro interpretaci atomových spekter

První požadavek vznikl v situaci, kdy aparatura CAPEX již generovala krátký pulz XUV záření, o kterém bylo zřejmé, že pochází z pinčujícího plazmatu, ale nebylo jisté, zda se již jedná o očekávaný laser. Bylo sejmuto množství XUV spekter v různých časových fázích kapilárního výboje při expozici 30 ns a mým úkolem bylo vytvoření pomocného software, který by usnadnil jejich jednoznačnou interpretaci v tom smyslu, zda a za jakých konkrétních podmínek dochází v pinčujícím argonovém plazmatu v kapiláře k dostatečnému ohřevu, potřebnému pro vznik významného podílu iontů Ar^{8+} a pro generaci čáry 46.9 nm XUV laseru, jak bylo specifikováno v kapitole [Princip Roccova laseru využitý u aparatury CAPEX \(2.1.3.\)](#) Dosavadní systém interpretace totiž neposkytoval jednoznačné výsledky zejména proto, že se opíral pouze o prosté vyhledávání jednotlivých spektrálních čar, jejichž identifikace často nebyla jednoznačná, jelikož mnohé čáry pocházející z různých iontů často více či méně splývaly. Na základě tohoto požadavku jsem vyvinul software s názvem Interaktivní systém pro interpretaci atomárních spekter ([P6 - Straus et al., 2004](#)), usnadňující přiřazení elektronové teploty tím, že namísto hledání a porovnávání poměrů jednotlivých vybraných čar umožňuje průběžné porovnávání celého rozsahu experimentálního spektra s jednoduchým modelem pro nastavitelnou elektronovou teplotu. Jak bylo konkretizováno v části [Spektroskopické prokázání laserování \(2.4.\)](#) s odkazem na podrobný popis v [P7 - Straus et al., \(2005\)](#), bylo s pomocí tohoto software skutečně laserování na aparatuře CAPEX prokázáno.

4.2. Zaměřovací viditelný laser

Prvním požadavkem byla pomůcka pro nastavování diagnostických prvků do osy XUV laseru. Jako nejjednodušší způsob se dobře osvědčila následující metoda:

Pomocí dostatečně velkého luminiscenčního stínítka a zafixovaného fotografického aparátu se identifikuje střed laserové stopy. Potom se otevře vakuová komora a do ústí kapiláry zakončeného sdruženou zemní elektrodou se svým hrotem opře zaměřovací viditelný laser dle [obr. 4-1](#), který je seřízen tak, že jeho paprsek vychází na opačnou stranu, než směřuje jeho hrot, ale leží ve stejné přímce. Jeho paprsek se pomocí x-y mikroposuvů zaměří do bodu, kde byl střed stopy na luminiscenčním stínítku, k čemuž opět využijeme fixovaný fotoaparát. S pomocí tohoto zaměřovacího laseru pak snadno nastavíme všechny potřebné optické prvky do osy budoucího XUV laseru. Takto nastavujeme např. i vzorky pro expozici zaostřeným XUV laserovým svazkem, neboť multivrstvé zrcadlo prakticky ekvivalentně odráží i tento viditelný laser.



Obr. 4-1 Viditelný laserový zaměřovač pro nastavování optických prvků aparatury CAPEX. Jeho paprsek vychází směrem doprava a je nastaven do osy hrotu na levé straně.

4.3. Variabilní luminiscenční stínítko

Luminiscenční stínítko na bázi ZnS jsme používali mimo jiné ke zviditelnění XUV laserového svazku pro získání orientační představy o jeho profilu, divergenci a v další fázi také pro jeho přibližnou fokusaci multivrstevným zrcadlem. Zpočátku jsme si pro naše účely nechávali stínítka průmyslově nanášet, což sice představovalo výhodu spočívající ve standardní kvalitě, ale na výrobu jsme vždy museli určitou dobu čekat a měla i další nevýhody:

1. byli jsme odkázáni na standardní zrnitost luminoforu,
2. jako podložka se používalo výhradně sklo, což bylo někdy trochu svazující.

Díky náhodnému hovoru s naším předním odborníkem na scintilační detektory Ing. Martinem Niklem, CSc. jsem se dozvěděl, že není problém, vytvořit si improvizované luminiscenční stínítko nanesením práškového luminoforu na celkem libovolný povrch po jeho potření lepidlem – např. Kanagonem. Po několika zkouškách mimo jiné s naleptaným povrchem plexiskla kyselinou octovou se nám velmi osvědčila úplně jednoduchá metoda, kdy lepidlo na povrchu izolepy posypeme luminoforem, jehož část se přilepí a zbytek se setřese a může se použít příště znovu. Takto lze pomocí jednostranné i oboustranné izolepy vytvářet luminiscenční stínítka vyhovující kvality prakticky libovolných tvarů – např. ve tvaru mezikruží. Použitelnost takových variabilních detektorů se tím rozšířila např. tak, že bylo možné rychlé a pohodlné zaměření XUV laseru na libovolné prvky (filtry, zrcadlo, XUV fotodiody) po nanesení luminoforu na jejich okraje. Jeden z příkladů takto vyrobeného stínítka je možno vidět na [obr. 4-12](#).

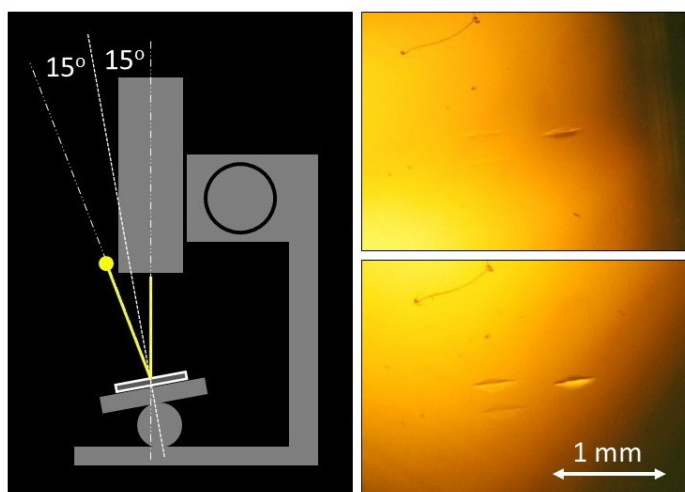
4.4. Metoda "šikmého pozorování" neviditelných stop běžným mikroskopem

Další požadavek souvisel s potřebou vyhodnocovat průběh fokusace XUV laserového svazku, kdy bylo potřeba průběžně citlivě zviditelňovat jeho stopu při malých změnách vzdálenosti od zrcadla. Jakmile totiž velikost zaostřované stopy klesla pod 1 mm, přestávala vyhovovat standardní metoda jejího zviditelnění pomocí luminiscenčního stínítka a fotoaparátu. Stopa byla přesycená a jednotlivá zrníčka luminoforu se zřejmě ovlivňovala navzájem, přestože jejich zrnitost byla vyhovující (5 μm).

Měli jsme tedy XUV laser zaostřený do plošky o průměru cca 1 mm a pro další, jemnější určení ohniska jsme byli odkázáni na interpolaci. I tak jsme se již dostali do situace, kdy by mělo být možno vytvářet trvalé stopy do pevných látek. Bylo totiž známo, že obdobně zaostřený laser je

schopen vytvářet miniaturní krátery např. do PMMA, pozorované ovšem obvykle pouze mikroskopem s velkým kontrastem, umožňujícím detekovat i mělké krátery.

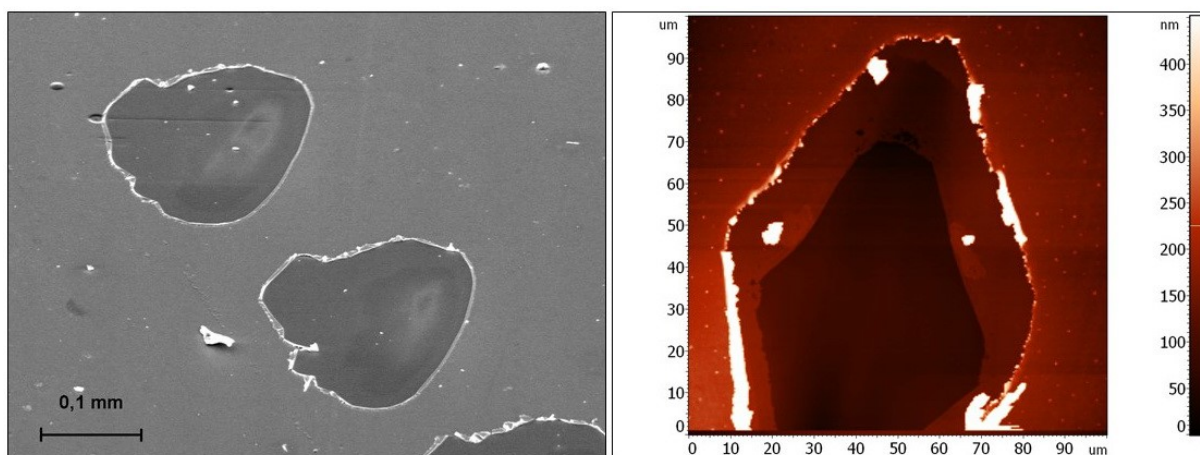
Při usilovné snaze o nalezení našich prvních stop XUV laseru i bez speciálního mikroskopu jsem běžným stereomikroskopem analyzoval velký počet domnělých stop a pravidelně se vždy ukazovalo, že se jedná o všelijaká smetí, i když vypadající velmi věrohodně, až se konečně v šikmém pohledu a za pomoci speciálně skloněného protisvětla objevila velmi obtížně viditelná stopa, která se ukázala jako pravá – viz obr. 4-2. Vznikla jednoduchá metoda, s jejíž pomocí nyní běžně pozorujeme nekонтastní mělké stopy.



Obr. 4-2 Vlevo: Uspořádání pro "šikmé pozorování" nekонтastních stop optickým mikroskopem žlutá tečka představuje bodový zdroj světla, např. LED. Vpravo: První trojice "šikmo pozorovaných" stop XUV laserové ablace PMMA. Největšího kontrastu se docílí na hranici osvětleného pole. **Nahoře:** dobře viditelná je pouze jedna stopa, **dole:** bočním posunutím zdroje světla se na hranici osvětleného pole zviditelnily další dvě stopy.

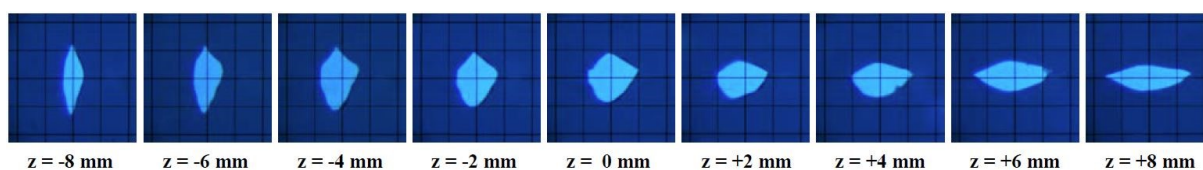
4.5. Zlatý ablační detektor

O první dokonalejší zobrazení takto nalezené stopy jsme se pokoušeli pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (Scanning Electron Microscopy -SEM)). Přestože stopu s nalézt nepodařilo, technologie SEM nám přinesla významný pokrok: Jelikož pro pozorování SEM se tehdy na vzorek nanášela elektricky vodivá cca 50 nm tenká vrstva zlata, dostali jsme po analýze zpátky takto pozlacený vzorek s poměrně velkou nevyužitou plochou. Abychom nemuseli vyrábět nový vzorek, použili jsme pozlacený vzorek znovu v mylném domnění, že takto tenká zlatá vrstva nebude na závalu. S velkým překvapením jsme pak zjistili, že další laserové stopy ve zlaté vrstvě byly vidět proti světlu pouhým okem, protože poloprůhledné zlato v místě dopadu zaostřeného laseru vždy zcela zmizelo. Teprve v této situaci již bylo možno SEM správně zaměřit - viz obr. 4-3 Vlevo.



Obr. 4-3 Vlevo: SEM zobrazení ablačních stop XUV laseru v PMMA pokrytém vrstvou cca 50 nm Au, která v místě dopadu zcela zmizela. **Vpravo:** AFM zobrazení podobné stopy.

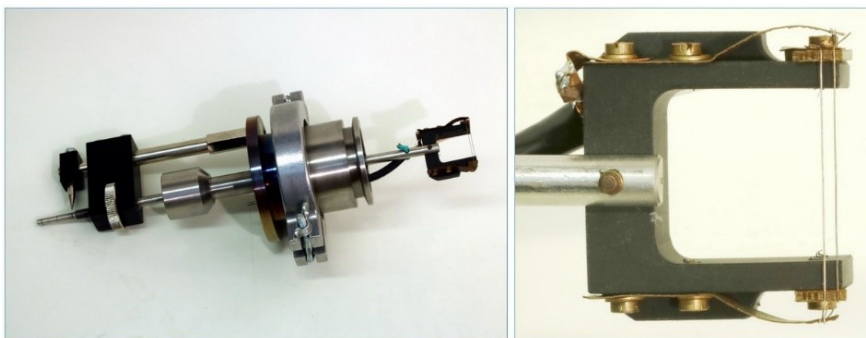
Podobně posloužilo zviditelnění stop zlatou vrstvou i pro zobrazování pomocí mikroskopu atomárních sil (Atomic Force Microscopy - AFM) - příklad je na tomtéž obr. 4-3 Vpravo. Obrys stopy je však dobře pozorovatelný i běžným optickým mikroskopem, takže tímto způsobem vznikl skutečně citlivý a kontrastní detektor zaostřeného laserového svazku, umožňující průběžně monitorovat jak polohu stopy, tak její velikost a tvar, což nám usnadnilo další zaostřování i přesné zacílení při expozici různých materiálů – viz obr. 4-4.



Obr. 4-4 Jemné zaostřování XUV laseru sférickým multivrstevným zrcadlem s pomocí Au/PMMA ablačního detektoru. Velikost oka měřicí mřížky je 125 μm . (P4 - Kolacek et al., 2012)

4.6. Průchozí vakuová XUV fotodiody

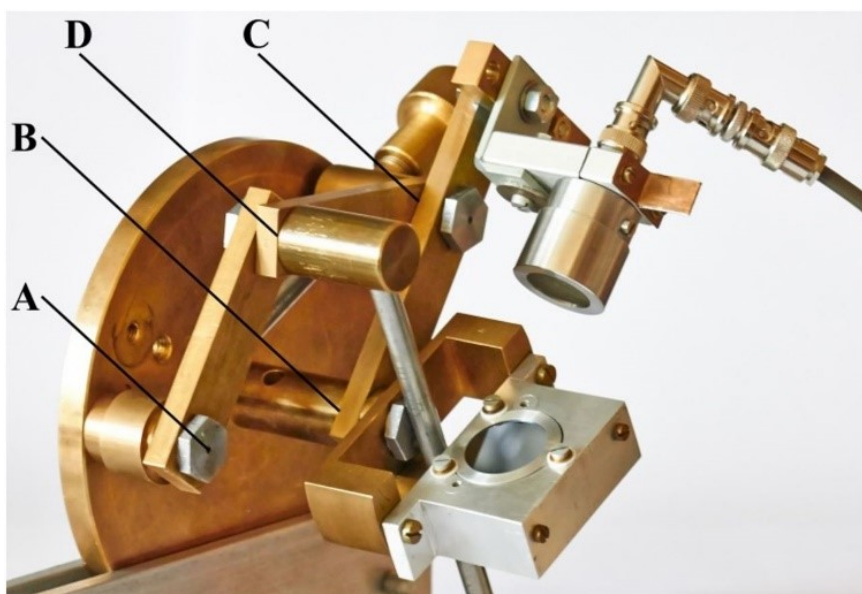
Dalším požadavkem bylo průběžné sledování energie XUV laserového pulzu zároveň s expozicí vzorků. Dosavadní monitorování pomocí standardní vakuové XUV fotodiody samozřejmě vždy pohltilo celý XUV pulz, takže buďto mohl být pulz monitorován anebo byl použit k expozici vzorku, takže nikdy nemohla být přesná evidence, jakým pulzem byl vzorek skutečně exponován. Jako řešení se přímo nabízela modifikace vakuové diody tak, že obvyklý plochý kovový terč s paralelní kovovou sítkou, byl nahrazen dvěma rovnoběžnými drátky (Užitný vzor, Straus a spol., 2016), které fungují stejně, ale pohltnou jen nepatrnou část profilu dopadajícího svazku. Za tuto cenu tak lze s jistým omezením přibližně monitorovat případné relativní fluktuační energie pro každý výstřel a zároveň exponovat vzorek zářením, které projde mimo drátky.



Obr. 4-5 Drátková XUV fotodioda (Užitný vzor, Straus a spol., 2016), instalovaná ve vakuové průchodce rychlospoje DN50 s polohovacím mechanismem.

4.7. Přípravek pro měření XUV směrové odrazivosti

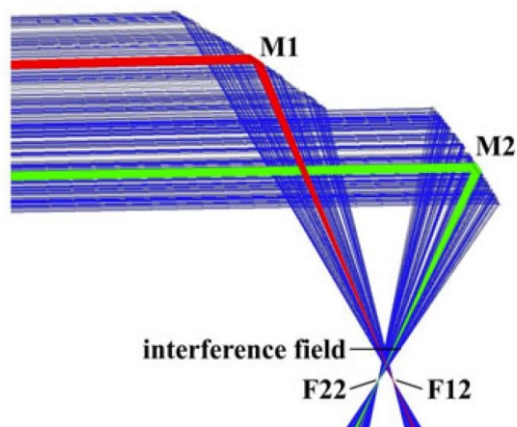
Dříve používaný pantografický přípravek, určený původně k jinému účelu, jsme upravili tak, jak to vidíme na obr. 4-6: Klouby **A** a **B** jsou otočně spojeny s kruhovou základnou, zatímco klouby **C** a **D** jsou volné. Dvěma kolmými kluznými táhly jsou spojeny klouby **AC** a **BD**. Na kloubu **B** je umístěn držák testovaného zrcadla tak, že rovina zrcadla leží v ose otáčení kloubu **B** a je kolmá k táhlu spojující klouby **BD**. XUV fotodioda je přichycena k rameni spojujícímu klouby **BC** tak, že její osa je s ním rovnoběžná a směřuje do středu zrcadla. Výsledkem je, že při otáčení ramene **CB** s XUV fotodiodou okolo kloubu **B** se zároveň otáčí zrcadlo, ale o poloviční úhel. Jestliže kruhovou základnu pantografu upevníme tak, aby paprsek XUV laseru byl rovnoběžný se spojnicí průmětů kloubů **A**, **B** do kruhové základny a dopadal do středu zrcadla, pak po odrazu od něj dopadne i do středu XUV fotodiody a tato situace se bude zachovávat pro libovolný úhel natočení XUV zrcadla (pantografu). Při umístění celého systému do vakuové interakční komory lze mechanickým táhlem přes vakuovou průchodku definovaně natáčet rameno **BC** a tím volit různé úhly dopadu. Prakticky toto uspořádání umožňuje měřit odrazivost v rozsahu cca od 30 do 60 stupňů.



Obr. 4-6 Přípravek pro měření XUV směrové odrazivosti. Klouby **A**, **B** jsou pevně spojeny s kruhovou základnou, klouby **C**, **D** jsou volné. Držák s měřeným zrcadlem je umístěn na kloubu **B**, XUV fotodioda je spojena s ramenem **BC**. Při jejím otáčení kolem kloubu **B** se současně o poloviční úhel otáčí zrcadlo.

4.8. XUV Interferometr pro ekvidistantní nanostruktury

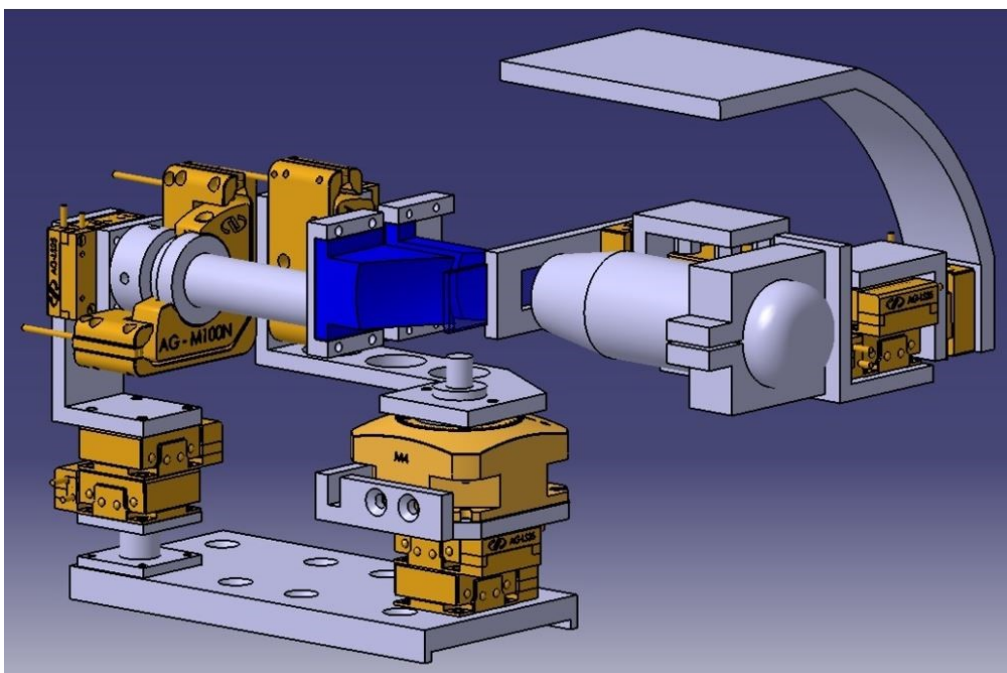
Na základě generace nanostruktur difrakcí XUV laseru na okrajích oka síťky, popsané v části [Přímé nanostrukturování povrchu PMMA \(5.1.\)](#), vznikla představa o reálné možnosti vytvářet analogické nanostruktury ekvidistantně, s větším kontrastem a s co nejkratší periodou. S tímto záměrem vznikl projekt XUV interferometru, který je rovněž podrobně popsán v [P4 - Kolacek et al. \(2016\)](#).



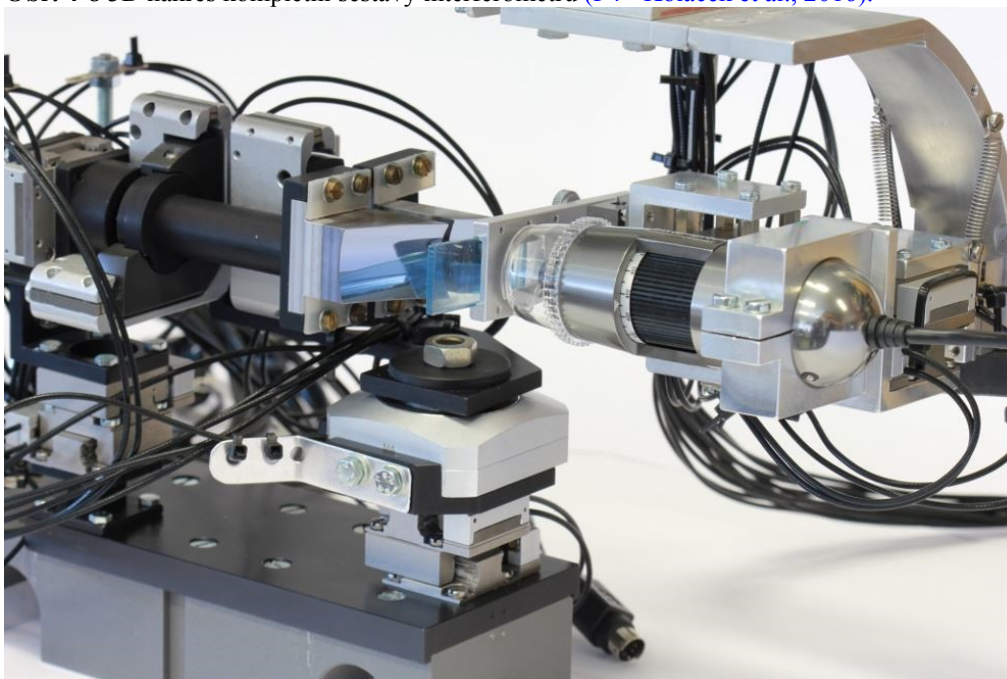
Obr. 4-7 Počítačová simulace (ray tracing) detailu XUV interferometru se dvěma elipsoidálními multivrstevnými zrcadly M1 a M2, z nichž každé fokusuje část primárního laserového svazku do ohnisek F12 a F22, přičemž v překřížení odražených svazků těsně před ohnisky dochází k interferenci. ([P4 - Kolacek et al., 2012](#))

Jednalo se o interferometr se dvěma elipsoidálními zrcadly, rozdělujícími laserový svazek tak, že jeho střed je nastaven na hranu prvního zrcadla, na které tak dopadne zhruba polovina svazku, zatímco druhá polovina pokračuje na druhé zrcadlo, umístěné v malém odstupu za prvním. Odražené a zaostřené svazky se protnou těsně před svými ohnisky tak, že mohou navzájem interferovat v oblasti o velikosti cca 2 μm , jak je schematicky patrné z [obr. 4-7](#).

I přes velkou experimentální náročnost se projekt s interferometrem podařilo technicky realizovat ([Užitný vzor, Kolacek a spol., 2014](#)). Ve spolupráci s oddělením Toptech našeho ústavu a s Ústavem Přístrojové Techniky AVČR, v.v.i. byla vyrobena dvojice semi-elipsoidálních multivrstevných zrcadel, ve vakuové komoře byl sestaven systém pro jemné polohování zrcadel a dále systém pro polohování detektoru, průběžně snímaného pomocí USB mikroskopu. Na [obr. 4-8](#) je 3D náčrtek a na [obr. 4-9](#) fotografie realizovaného interferometru.



Obr. 4-8 3D nákres kompletní sestavy interferometru (P4 - Kolacek et al., 2016).

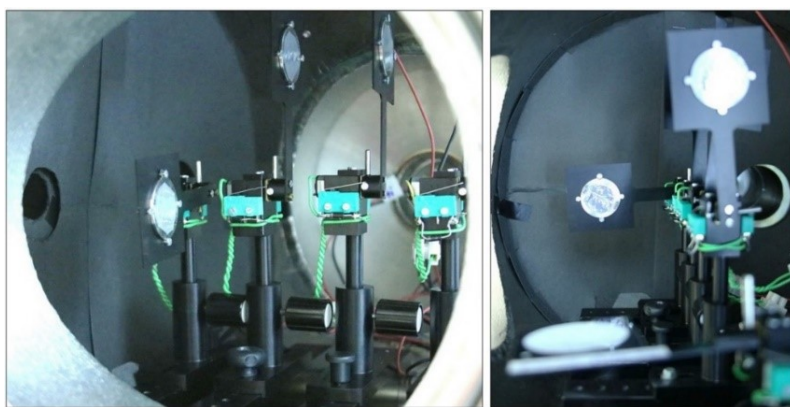


Obr. 4-9 Fotografie kompletní sestavy interferometru (P4 - Kolacek et al., 2016).

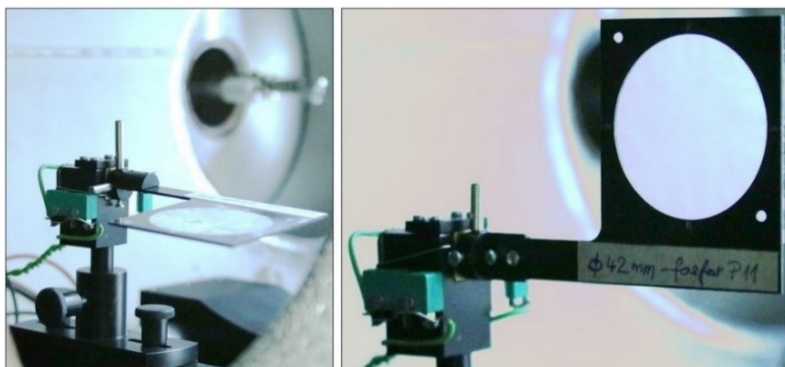
Jako detektor interferujících XUV svazků byla použita destička PMMA opatřená vrstvou zlata o síle cca 6 nm, na které od určitého stupně zaostření zůstávala po každém výstřelu dobře viditelná stopa. Tak bylo možno dálkově postupně seřizovat obě zrcadla, hledat polohu obou ohnisek a pak sledovat a nastavovat místa průtů obou svazků včetně detekce případných interferenčních proužků. Jenže silné interferenční proužky jsme detekovali již při expozici vzorku svazkem odraženým od jednoho či druhého zrcadla samostatně. Perioda proužků byla řádově větší, než očekávaná (cca 1 μm oproti očekávané periodě 100 nm) a tyto proužky byly zřejmě důsledkem tvarové nedokonalosti našich zrcadel. Ta sice byla vyrobena s největší péčí, ovšem při limitaci kontrolních metod, určených pro viditelné spektrum. Další práce na interferometru byla proto s ohledem na limitující kvalitu dostupných zrcadel přerušena.

4.9. Elektrické manipulátorky do vakua

Prakticky při jakékoli práci s XUV laserem se nevyhneme používání tenkých kovových filtrů pro definované oddělení nebo zeslabení záření určitých vlnových délek. Zpočátku jsme používali ke vkládání filtrů do laserové dráhy pohyblivé vakuové průchodky s Wilsonovým těsněním (Wilson R.R., 1941) ovládané vzhledem ke své robustnosti ručně. Pro situaci, kdy bylo výhodné měnit více typů filtrů v rychlém sledu jsme v analogii s mechanickým semaforem navrhli a vyrobili sadu manipulátorků s motorovým pohonem pracujícím ve vakuu, které umožňovaly snadné dálkové ovládání - viz obr. 4-10. Přestože myšlenka je triviální, jejich přínos byl značný. Jeden ze stojánků byl konstruován na sklápění z vodorovné polohy, aby jeho pracovní poloha byla vzhledem k laserové stopě s velkou přesností reprodukovatelná, a ten ve spojení s luminiscenčním stínítkem umožňuje mimo jiné i přesné zaměření a fixaci osy laseru viz obr. 4-11.



obr. 4-10 Sada manipulátorků pro vkládání filtrů do dráhy XUV laseru ve vakuové interakční komoře.



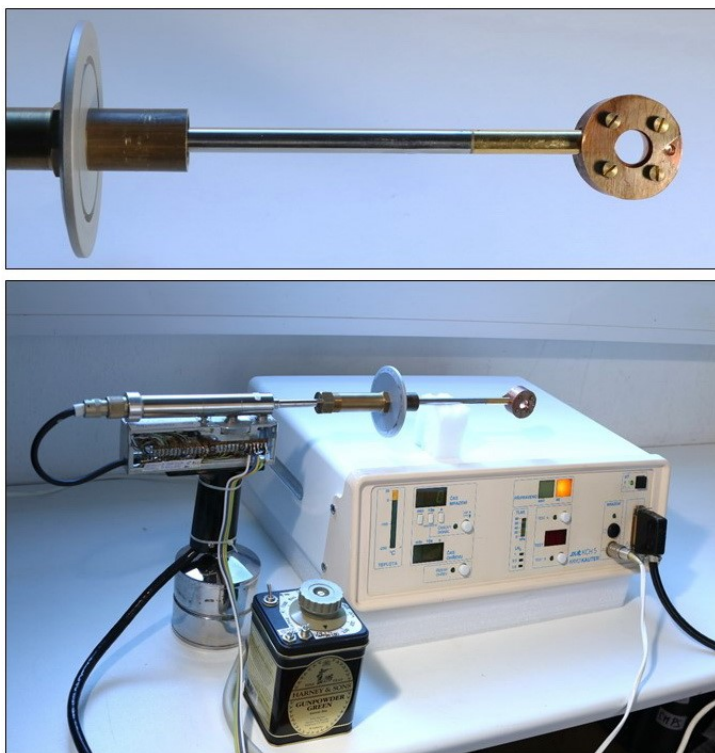
obr. 4-11 Sklápěcí stojánek pro reprodukovatelné vkládání luminiscenčního stínítka.

4.10. Teplotně nastavitelné uchycení vzorku

4.10.1. Kryostat do -190 °C

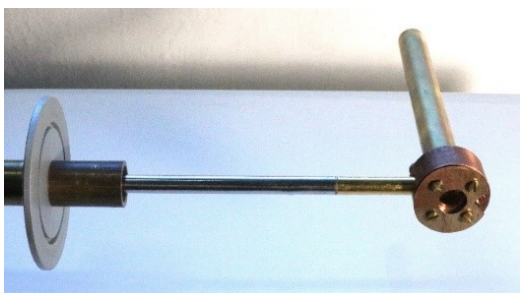
Během paralelní spolupráce s FZÚ AVČR, v.v.i., vlastníci komerční verzi Roccova laseru a ve FZÚ hostující čínskou studentkou vznikl požadavek na snížení teploty vzorku. Ten nejprve řešili ve FZÚ pomocí Peltierova článku, ale pro problémy s řízením teploty došlo k popraskání vzorků citlivých na rychlost ochlazování. Vzhledem k tomu, že dříve jsem se podílel na vývoji a výrobě kryochirurgického přístroje pro destrukci patologické tkáně rychlým zmrazením pomocí tzv. kryokauteru ([US patent - Štraus, 1997](#)) a měl jsem jeden tento přístroj k dispozici, nabízela se možnost adaptovat jej pro požadovanou funkci.

Vzhledem k požadavku na pomalé teplotní změny jsme použili masivní měděný držák vzorku o velké tepelné kapacitě. Operační nástroj kryokauteru jsme opatřili vakuovou průchodkou a jeho aktivní konec jsme tepelně kontaktovali s držákem vzorku viz [obr. 4-12](#) Vzhledem k jednorázové potřebě jsme regulaci teploty prováděli ručně, s pomocí jednoduchého přípravku.



Obr. 4-12 Použití upraveného kryokauteru KCH5 ([US patent - Štraus, 1997](#)) pro expozici kruhových vzorků XUV laserem při nízkých teplotách do 70K.

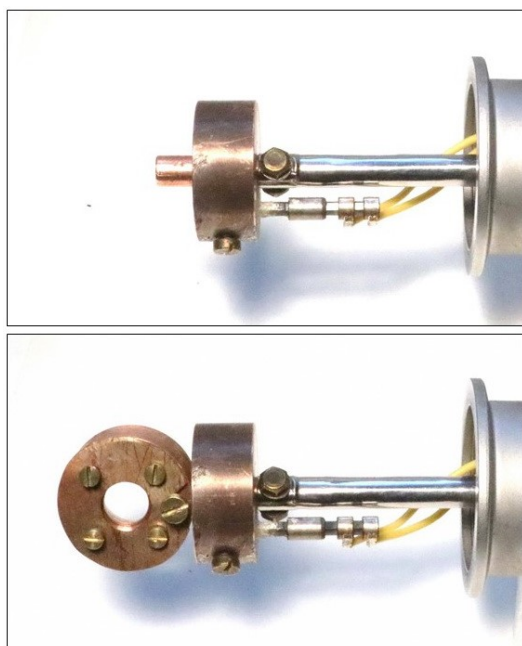
Teplotu vzorku jsme měřili na tělese jeho držáku kalibrovaným komerčním termočlánkem s tím, že po ustálení teploty jsme ponechávali čas na vyrovnání teploty vzorku s teplotou držáku, předpokládajíc, že ve vakuu bude rozdíl mezi těmito teplotami nepodstatný již cca po 1 minutě. Při první expozici vzorku při nízké teplotě se ukázalo, že vzorek je pokryt drobnými kapičkami, později identifikovanými jako kondenzované olejové páry, jež mohly pocházet z nestandardních součástí aparatury. Kondenzaci oleje na podchlazeném vzorku se nám podařilo potlačit umístěním jeho aktivní plochy do stínící chlazené trubky dle [obr. 4-13](#), na níž olejové páry kondenzovaly přednostně. Takto jsme úspěšně realizovali sadu expozic vzorků při teplotách od -25 °C, až do cca -180 °C, při dodržování pomalých rychlostí změn teploty cca 1K/min. Podrobnější informace jsou v kapitole [Teplotní závislost rychlosti ablace BaF₂ \(5.6.\)](#).



Obr. 4-13 Držák kruhového vzorku $\phi 13$ mm opatřený stínící vymrazovací trubicí proti kondenzaci olejových par na vnitřní straně vzorku. Držák je třeba nastavit tak, aby XUV laser procházel stínící trubicí o vnitřním průměru 14 mm.

4.10.2. Termostat do 400 °C

Po zvládnutí nízkoteplotní generace nanostruktur v BaF_2 logicky vznikl požadavek na temperování vzorku do vyšších teplot. K tomuto účelu se opět nabízely pozůstatky aparatury z jiné mé práce, kdy jsem pro švýcarskou firmu TRESKY AG, vyrábějící mikromanipulátory pro vývoj čipů, vyvíjel teplotní plošinku pro rychlé střídání teplot mezi pokojovou teplotou a předvolenou teplotou až do 400 °C. Nakonec jsme použili pouze jeden speciální termistorový topný článek tepelně kontaktovaný k upravenému držáku z výše popsaného kryostatu – viz [obr. 4-14](#), kde je vidět jeho napojení na manipulační hřídel přes tepelně izolační tenkostěnnou trubku. Tento přípravek nakonec neobsahoval chladicí výměník, protože pro jeho ochlazování zpět na pokojovou teplotu požadovanou nízkou rychlostí 1 K/min. plně dostačoval řízený lehký dotyk tohoto přípravku s pláštěm interakční komory, k tomuto účelu opatřené z vnitřní strany nákrůžkem z měděné tkaniny. Pomocí tohoto přípravku jsme exponovali vzorky při teplotách do +200 °C při nárůstu a poklesu teploty požadovanou rychlostí cca 10 K/min. Termostat byl zkoušen až do teploty +400 °C.



Obr. 4-14 Přípravek pro ohřev vzorku s termistorovým topným článkem tepelně kontaktovaný k držáku kruhového vzorku z [obr. 4-12](#). Tepelné ztráty jsou potlačeny vložením tenkostěnné trubičky z nerezavějící oceli mezi ohřívanou část a vakuovou průchodku.

4.11. Shrnutí pomůcek

Byly popsány originální pomůcky a přístroje používané při vývoji a provozu aparatury CAPEX, včetně důvodů a okolností jejich individuálního vzniku. S výjimkou XUV interferometru, který přes mimořádnou sofistikovanost nakonec pro neadekvátní technologii výroby zrcadel neposkytoval očekávané výsledky, většina těchto pomůcek našla praktické uplatnění. Některé z nich sice jsou pouze jinou cestou k řešení problému, se kterým se ostatní laboratoře rovněž museli nějak vypořádat, ale ve dvou případech se jednalo o významnější přínos:

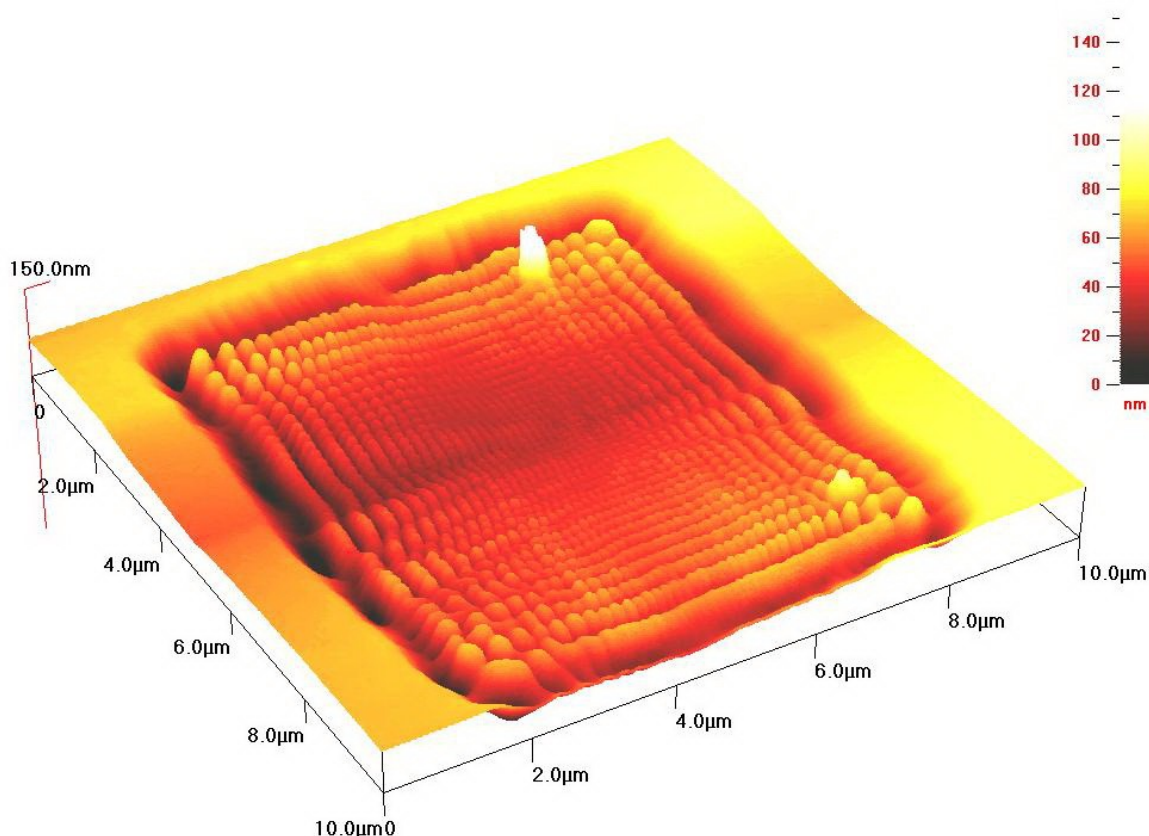
1. [Průchozí vakuová XUV fotodioda \(4.6\)](#), která s pouze nepatrným zastíněním XUV laserové stopy umožňuje simultánní orientační monitorování energie laseru zároveň s expozicí vzorku, což doposud nebylo běžné. Tento diagnostický prvek podstatně zkvalitnil většinu experimentů rozptýlením pochybností o reprodukovatelnosti XUV laserového pulzu při každé expozici vzorku.
2. [Teplotně nastavitelné uchycení vzorku \(4.10\)](#), přestože fakticky nepředstavuje nic, co by nebylo dosud známo, umožnilo realizovat patrně první expozice vzorků XUV laserem při extrémních teplotách.

Lze konstatovat, že využitelnost XUV laseru CAPEX byla vytvořením pomůcek popsaných v této kapitole znatelně rozšířena.

5. Aplikace laseru CAPEX

5.1. Přímé nanostrukturování povrchu PMMA

Naše první pokusy o interakci s povrchem pevných látek jsou podrobně popsány v **P4 - Kolacek et al. (2012)**. Jednalo se o ablací povrchu plexiskla (PMMA - Polymethylmethacrylate) XUV laserovým svazkem zfokusovaným pomocí multivrstvého (ScSi, $\phi 40/R2100$) zrcadla s quasi kolmým dopadem na velikost stopy cca $200\ \mu\text{m}$. Nejzajímavější výsledek byl dosažen tak, že jsme do ohniska zrcadla umístili vzorek PMMA a exponovali jej přes jemnou galvanoplasticky vyrobenou zlatou síťku o tloušťce $5\ \mu\text{m}$ se čtvercovými oky o velikosti strany $7,5\ \mu\text{m}$, přiloženou těsně k jeho povrchu. Pod jednotlivými oky exponovaného povrchu PMMA pak bylo možno identifikovat krátery zasahující do hloubky cca $40\ \text{nm}$ na jeden výstřel. Při detailním zkoumání profilu těchto kráterů jsme objevili zajímavou jemnou strukturu, patrnou na **obr. 5-1** pořízeném pomocí mikroskopu atomárních sil. Pro reálnou představu o skutečné míře zvrásnění povrchu kráteru je však třeba vzít v úvahu,



Obr.5.1 Výsledek AFM analýzy ablačního vzoru vytvořeného v PMMA expozicí XUV laseru CAPEX přes těsně přiloženou zlatou síťku o tloušťce $5\ \mu\text{m}$ s čtvercovými oky o hraně $7,5\ \mu\text{m}$. Mapovaná oblast se nachází pod jedním okem síťky. (**P4 - Kolacek et al., 2012**).

že z-ová souřadnice byla pro dosažení výraznějšího efektu 10-tinásobně protažena. Vznik této struktury si vysvětlujeme difrací koherentního XUV záření na hranách oka síťky.

Samotný fakt, že XUV laser je schopen jedním výstřelem vytvořit v povrchu PMMA takto jemnou strukturu (vzdálenost vlnek ve střední části kráteru je cca $120\ \text{nm}$, hloubka modulace cca $10\ \text{nm}$) může být podle mého názoru vítaným podnětem k prohlubování teoretických představ o mechanismech ablace nanosekundovým pulzem XUV laseru.

5.2. Ovlivňování magnetických vlastností tenkých vrstev

Při spolupráci s Ryszardem Sobierajskim - *Institute of Physics of the Polish Academy of Sciences, Warsaw, Group of Electron Microscopy and Spectroscopy*, který se zabýval studiem magnetických vlastností tenkých vrstev, vznikl požadavek, exponovat zaostřeným XUV laserem CAPEX sendvič skládající se z trojice tenkých vrstev Pt (3 nm) – Co (5 nm) – Pt (3 nm) nanesených na Safírovém substrátu s orientací 001. Laserový svazek byl přitom záměrně zeslabován čtyřmi různými metodami:

1. Připouštěním vzduchu do interakční komory,
2. zúžením primárního svazku před dopadem na zrcadlo irisovou clonou,
3. řízeným „rozladěním“ optimálního pracovního tlaku Ar.
4. rozostřením stopy laserového svazku

Rozdíly ve výsledcích mezi jmenovanými metodami nebyly významné.

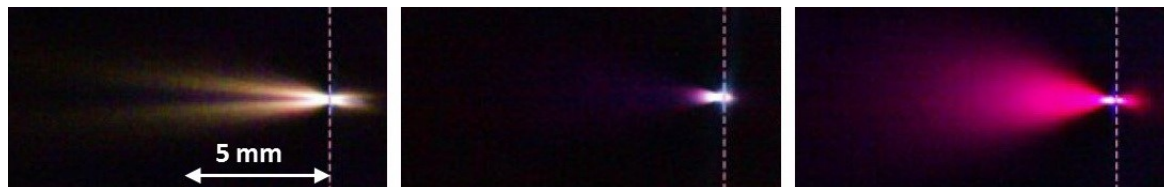
Na obr. 5-2 je ukázka dílčích výsledků při použití zeslabení připouštěním vzduchu. První z obrázků představuje stopu laseru na PMMA. Na druhém z obrázků je toutéž metodou zobrazen pohled na třívrstvý vzorek a na třetím je výsledek měření magnetických změn na povrchu vzorku, konkrétně jde o „Ker rotaci“. Vidíme, že změna magnetických vlastností je podobného plošného rozsahu jako změny pozorované na povrchu PMMA, zatímco mikroskopicky pozorované změny na třívrstevném vzorku jsou mnohem menšího rozsahu. Předběžně lze tedy říci, že ve vrstvách Pt-Co-Pt byly pozorovány magnetické změny i v místech, kde fluence XUV laseru nedosahovala ablačního prahu.



Obr. 5-2 Ukázka stop zeslabeného XUV laseru CAPEX s jednotnými parametry na PMMA (**vlevo**), na třívrstevném vzorku Pt(3nm)Co(5nm)Pt(3nm) na safírovém substrátu s orientací 001 (**uprostřed**). Oba snímky jsou pořízeny metodou popsanou v části [Metoda "šikmého pozorování" neviditelných stop běžným mikroskopem \(4.4.\)](#) (Zkreslení bylo kompenzováno). **Vpravo** je ve stejném měřítku výsledek magnetického měření Ker rotace. (Velikost hrany zobrazených čtverců je 200 μm .)

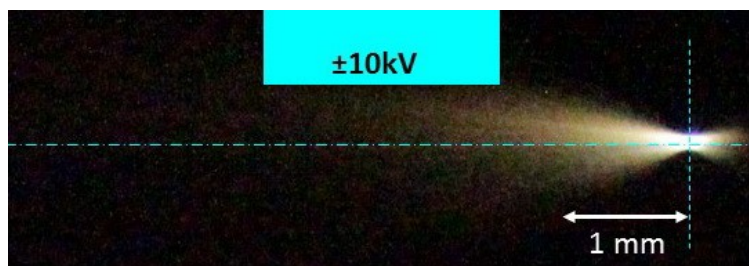
5.3. Pozorování optických efektů - "plumů" během ablace

Při ablací kráterů v různých materiálech je možno pozorovat a fotografovat nepatrné záblesky charakteristické materiálové barvy - tzv. "plumy" (P1 - Frolov, et al., 2016), jejichž ukázky pro tři materiály jsou na obr. 5-3.



Obr. 5-3 Fotografie ablačních plumů na zlatě (vlevo), CsI (uprostřed) a LiF (vpravo) po expozici jedním výstřelem XUV laseru CAPEX s energií cca 75 μ J. Čárkované čáry vyznačují povrch vzorku v místě dopadu laseru světelná stopa napravo od ní představuje zrcadlení plumu na lesklém povrchu vzorku. Fotografováno téměř kolmo na směr laserového svazku, který dopadá zleva (P1 - Frolov, et al., 2016).

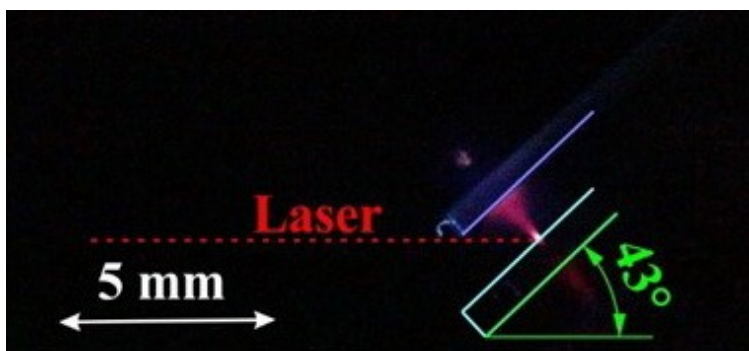
Při synchronizovaném fotografování plumů s laserem se ukázalo, že opticky pozorovatelný plume se začíná utvářet přibližně 100 ns po dopadu laserového pulzu (trvajících 1.5 ns). To může zásadně ovlivnit diskuzi o možném zeslabování účinku nanosekundových pulzů jejich pohlcováním při průchodu přes jimi vytvořený plume.



Obr. 5-4 Uspořádání experimentu pro sledování reakce plumu na přiložený elektrický potenciál vůči vzorku při střední energii laseru.

Dále jsme provedli sadu experimentů, při kterých jsme opět fotograficky sledovali chování plumu ve stejnosměrném elektrickém poli v uspořádání podle obr. 5-4. Na modře vyznačenou vychylovací elektrodu jsme postupně aplikovali vzrůstající napětí obou polarit vzhledem povrchu vzorku označenému svislou tečkovanou čarou a tvořeném vrstvou Au 50 nm na PMMA. Ani při velmi pečlivém zkoumání získaných fotografií jsme však nezjistili žádný prokazatelný vliv přiloženého napětí žádné z polarit. Co se však lišilo, bylo průrazné napětí: při záporné vychylovací elektrodě nedošlo k průrazu ani při nejvyšším použitém napětí -25 kV, při kladné vychylovací elektrodě inicioval dopad XUV laseru průraz už při napětí +10 kV. Z toho usuzujeme, že pozorovaný plume je směs elektricky neutrálních excitovaných částic a sekundárních elektronů.

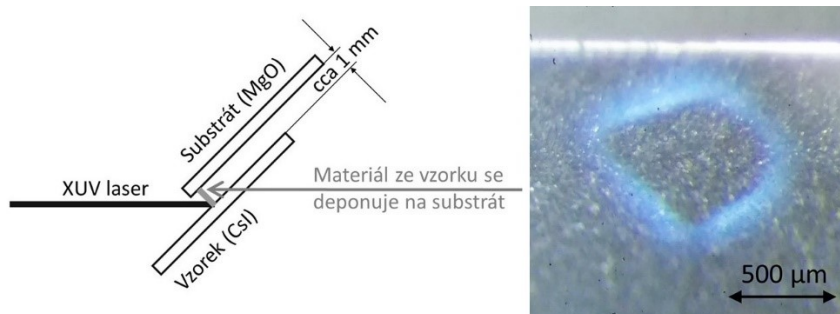
Náhodně jsme zjistili, že směr šíření plumu byl vždy kolmý k exponovanému povrchu bez ohledu na jeho natočení vůči laserovému svazku. Dobře je to vidět na obr. 5-5, zachycujícím plume emitovaný ze vzorku CsI natočeného vůči dopadajícímu svazku XUV laseru pod úhlem 43° při depozičním experimentu, popisovaném v další části.



Obr. 5-5 XUV laserová depozice materiálu ze vzorku CsI na paralelně umístěný substrát MgO vzdálený cca 1 mm, viz též schéma v levé části [obr. 5-6](#).

5.4. Depozice tenkých vrstev

Na základě požadavku kolegy P. Piry z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v.v.i. jsme provedli experiment, při kterém se nám podařilo nanést vrstvu CsI o síle 20 až 100 nm na substrát MgO.



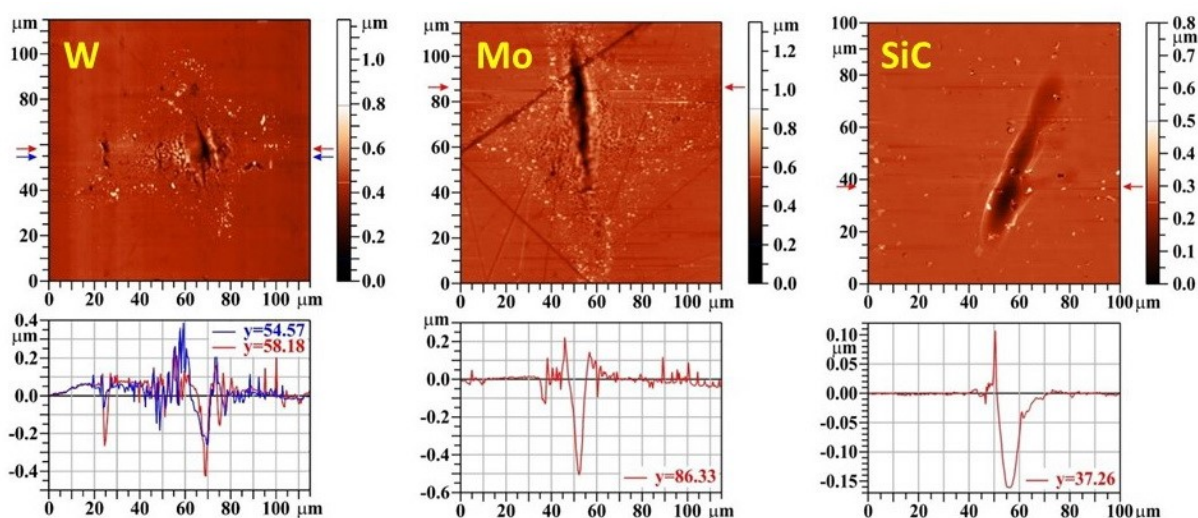
Obr. 5-6 Depozice materiálu ze vzorku CsI na substrát MgO XUV laserem CAPEX. Vlevo: schéma uspořádání experimentu v řezu. Úhel osy laserového svazku vzhledem k rovině vzorku i substrátu je cca 43°. Vpravo: mikrofotografie substrátu po 80 výstřelech s energií cca 75 μJ/1 výstřel.

Fotografie jednoho z 80-ti výstřelů během tohoto experimentu je na [obr. 5-5](#) a na dalším [obr. 5-6](#) vidíme společně se schématickým uspořádáním mikrofotografii deponované vrstvy. Rentgenová prášková difrakční analýza prokázala přítomnost krystalů CsI v deponované vrstvě. Její tloušťka se jen velmi přibližně odhaduje na 20 až 100 nm. Přestože se jedná pouze o první orientační experiment tohoto typu, považujeme za možné, že na tomto principu bude založena technologie pro vytváření velmi jemnozrnných scintilátorů.

5.5. Testování radiální odolnosti materiálů XUV ablací

V roce 2016 jsme dostali požadavek na expozici těžko ablovatelných materiálů – wolfamu, molybdenu a karbidu křemíku naším XUV laserem (Koichi Kasuya - *Institute of Applied Flow, 3-24-4 Utsukushigaoka-Nishi, Aoba, Yokohama, Kanagawa 225-0001 Japan*). O prvních výsledcích je zmínka v [Kasuya et al. \(2016\)](#) a podrobnější prezentace a vyhodnocení předkládáme v připravované publikaci [P9 - Straus et al. \(subm. 2018\)](#). Na [obr. 5-7](#) je na snímcích z mikroskopu atomárních sil (AFM) vidět odlišná reakce uvedených materiálů po 20 výstřelech. Ukázalo se mimo jiné, že prohlubování kráterů s počtem akumulovaných výstřelů není lineární v tom smyslu, že rychlost ablace klesá, k čemuž nás napadají dvě možnosti

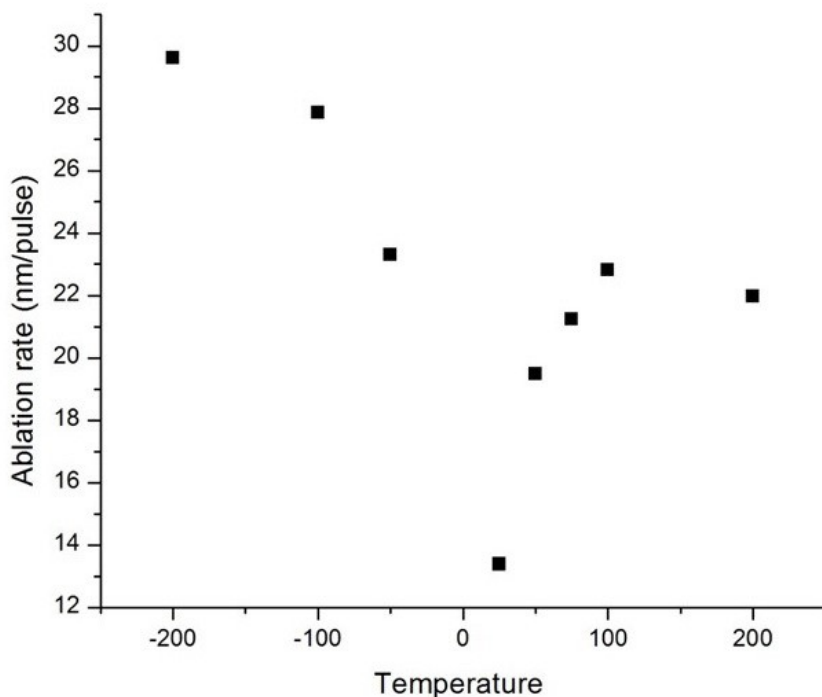
vysvětlení: Buďto je tato nelinearita způsobena sníženým ablačním prahem povrchové vrstvy modifikované leštěním, nebo postupným zvyšováním ablačního prahu povrchové vrstvy kráteru modifikované předchozími expozicemi XUV záření. Dále jsme k podrobnému zkoumání vytvořených stop, použili také skenovací elektronový mikroskop (SEM) pro šikmý pohled na stěnu "příkopu" vyhloubeném do povrchu kráterů iontovým svazkem. Tak bylo možno kromě hloubky kráterů hodnotit také mikrostrukturální změny v blízkosti jejich povrchu, což lze využít při návrhu komplexnější metody testování radiační odolnosti. Celkově lze výsledek prozatím shrnout tak, že přestože aplikace XUV laserová ablace při vývoji a zkoušení vysoce odolných materiálů stále zůstává otevřenou otázkou a žádná konkrétní metodika nebyla dosud ustavena, lze předpokládat, že pouhé srovnávání kráterů může být jedním z vodítek při změnách technologie přípravy takových materiálů v rámci jejich vývoje.



Obr. 5-7 AFM obraz povrchu tří vysoce odolných materiálů, W, Mo, SiC, po expozici 20 výstřely XUV laseru CAPEX s energií cca 25 μJ.

5.6. Teplotní závislost rychlosti XUV ablace BaF₂

Během spolupráce s kolegyní Huaiyu Cui, studentkou doktorského studia z Harbin Institute of Technology, National Key Lab Sci & Technol Tunable Laser, Harbin 150001, Peoples R. China, jsme při pokojové teplotě exponovali vzorky BaF₂ na kterých byly pozorovány tzv. Laser Induced Periodical Surface Structures (LIPSS). Cílem bylo porovnání těchto výsledků s výsledky dosaženými na kapilárním Ar laseru v Harbinu a na Roccově laseru zakoupeném FZÚ AVČR, v.v.i. Kromě toho jsme provedli sadu experimentů při teplotách v rozmezí od -180 °C do +200 °C., ze kterých stojí za povšimnutí pravděpodobně první teplotní závislost rychlosti ablace na obr. 5-8. Počínaje od pokojové teploty, rostla rychlost ablace jak s rostoucí teplotou, tak s klesající teplotou. Výsledky jsou překvapující a prozatím nebylo nalezeno jejich uspokojivé teoretické zdůvodnění. Zatímco část teplotní závislosti od pokojové teploty výše je přirozeně vysvětlitelná prostě tím, že při vyšší teplotě dochází snadněji k narušování vazeb materiálu vzorku dopadem XUV laseru, část od pokojové teploty směrem k nízkým teplotám je předmětem diskuze. Jsem přesvědčen, že k jejímu pochopení by bylo třeba prostudovat příslušné krátery, což by mělo být předmětem dalšího zájmu. Každopádně by však bylo potřeba nejprve tyto výsledky důkladně experimentálně prověřit jejich podrobnějším zopakováním. Pro expozice vzorků XUV laserem při různých teplotách byla použita zařízení popsána v části [Teplotně nastavitelné uchycení vzorku \(4.10\)](#).



Obr. 5-8 Teplotní závislost rychlosti XUV ablace. Teplota je ve °C. Měření bylo provedeno s XUV laserem CAPEX při energii pulzu cca 25μJ na vzorku BaF₂.

5.7. XUV Metrologie

Díky vyhovující stabilitě XUV laseru CAPEX jsme jej od roku 2013 začali používat také pro testování optických součástí aparatury, tj. multivrstvých zrcadel a Al filtrů.

5.7.1. Měření odrazivosti zrcadel pro XUV oblast

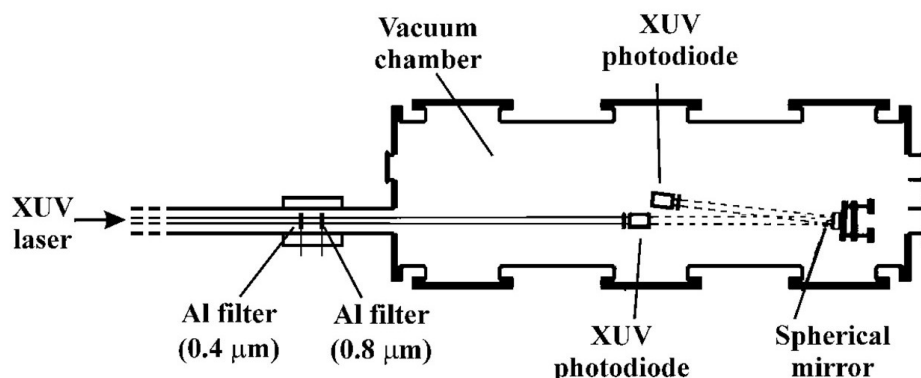
A. Měření odrazivosti pro kvazikolmý dopad

V průběhu používání prvního multivrstvého zrcadla jsme zaznamenali pokles jeho odrazivosti, ale v té době jsme ji ještě neměřili. Měření jsme začali provádět v roce 2013

([tab. 5-1](#)) po výměně zrcadla za nové (č.2) a pokračovali jsme v něm ještě dvakrát, s dvouletým odstupem. Jelikož pokles odrazivosti byl cca desetinásobný, zajímali jsme se také o odrazivost ekvivalentního materiálu bez multivrstev a ukázalo se, že je zhruba stejná jako u multivrstvého zrcadla po 4 letech provozu. Další nové multivrstvé zrcadlo (č.3) mělo opět odrazivost na úrovni nového předcházejícího zrcadla (č. 2) v době kdy bylo nové. Použité uspořádání experimentu je na [obr. 5-9](#). Domníváme se, že pozorované stárnutí je způsobeno degradací multivrstev dopadajícím zářením XUV laseru, ale exaktně jsme to neprokázali, takže se nedá zcela vyloučit ani prosté samovolné stárnutí vrstev. V každém případě považujeme za nejpravděpodobnější příčinu stárnutí multivrstev chybějící fixační mezivrstvy, která nebyla aplikována proto, že ji použitá technologie neumožňovala.

Tab. 5-1 Výsledky měření odrazivosti XUV laserem 46.9 nm při kvazikolmém dopadu pro dvě sférická multivrstvá zrcadla a ekvivalentní materiál bez multivrstev.

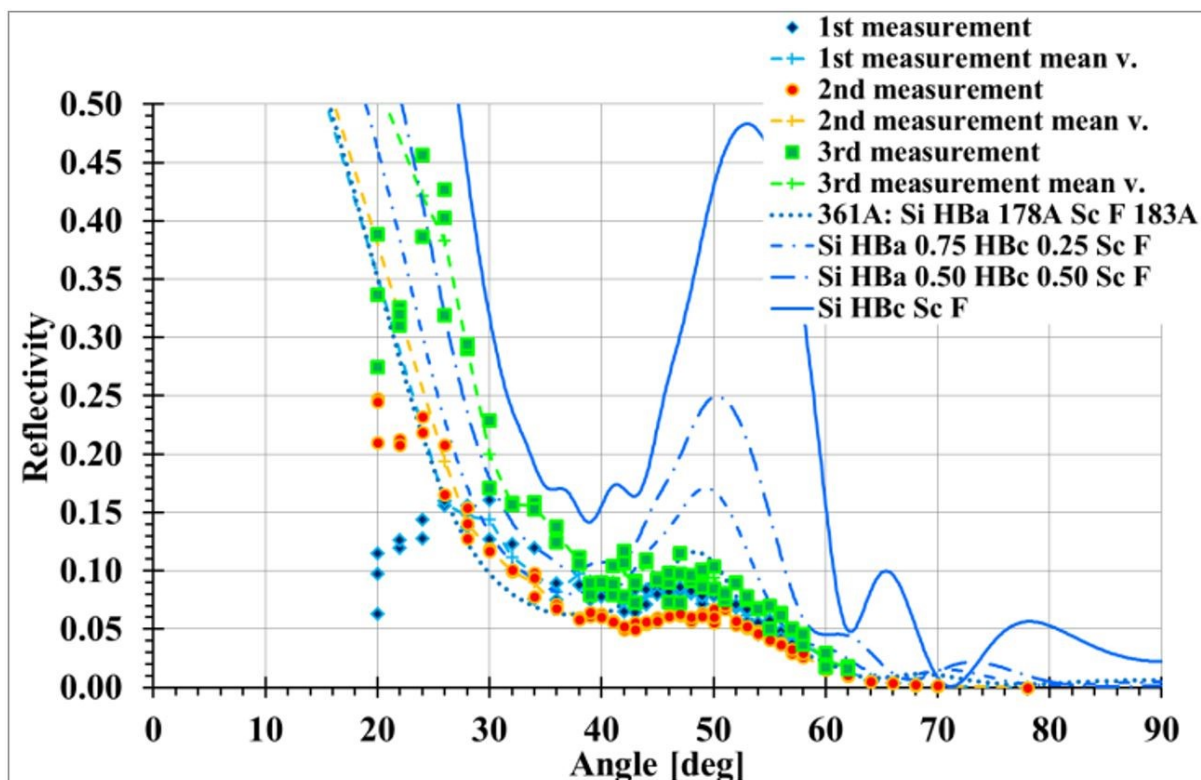
Zrcadlo	Rok měření	Odrazivost [%]
Sférické multivrstvé zrcadlo č. 2 z roku 2013	2013	22.5 +/- 3.4
	2015	12.2 +/- 1.1
	2017	2.2 +/- 0.6
Ekvivalentní materiál bez multivrstev	2017	2.4 +/- 0.4
Sférické multivrstvé zrcadlo č. 3 z roku 2017	2017	19.3 +/- 2.4



Obr 5-9 Schéma experimentu pro měření kvazikolmé odrazivosti multivrstvých zrcadel XUV laserem CAPEX. XUV fotodioda pro měření přímého svazku je na pohyblivém držáku aby nestínila při měření odraženého svazku.

B. Měření směrové závislosti odrazivosti

V souvislosti s výrobou speciálních elipsoidálních multivrstvých zrcadel pro konkrétní úhly odrazu, určených pro XUV interferometr jsme potřebovali předem ověřit, do jaké míry se skutečné vlastnosti multivrstev přiblíží teoretickým parametrům, pro které byly navrženy. Multivrstvy ScSi určené pro úhel odrazu $51,25^\circ$ jsme testovali na zkušebním rovinném vzorku pomocí přípravku popsaného v kap. [Přípravek pro měření směrové odrazivosti \(4.7.\)](#). Výsledky tří sérií těchto měření jsou společně s teoretickými křivkami na [obr. 5-10](#), převzatém z [P5 - Koláček et al. \(2016\)](#), kde jsou též uvedeny podrobnosti. Vidíme, že zatímco teoretická křivka (modrá plná čára) má kolem 51° výrazné maximum, maximum experimentálních bodů je pouze nevýrazné a je posunuto k menším úhlům. Příčiny této disproporce samozřejmě mohou být jak v technologii výroby, tak v metodice měření, neuvažujeme-li o možnosti chyby ve výpočtu. Co se týče experimentálních chyb, je zřejmé, že můžeme použít pouze určitý interval úhlů: při náklonu roviny zrcadla vzhledem k ose laseru o méně než cca 30° se laserový svazek o průměru cca 10 mm již nevejde do průmětu pětadvacetimilimetrového zrcadla a naopak při téměř kolmém dopadu bude detekční dioda zrcadlo zastiňovat. Ale uvnitř intervalu od 30° do 60° by měřené hodnoty měly být regulérní. Proto jsme hledali vysvětlení v technologii naprašování multivrstev a provedli jsme výpočty jejich odrazivosti ještě pro případy, kdy by se namísto krystalického křemíku předpokládala amorfni - modrá tečkovaná čára. Tím by se souhlas s experimenty zlepšil, ale zároveň by tím vznikly další nesrovnalosti, podrobněji diskutované ve zmíněném článku. Nicméně faktem zůstává, že je třeba počítat s mnohem nižší odrazivostí takto vyrobených zrcadel, tedy cca 10% oproti očekávaným téměř 50%.



Obr. 5-10 Závislost odrazivosti multivrstev na úhlu dopadu měřená XUV laserem CAPEX. Barevně odlišené body představují 3 série měření a modré křivky odpovídají výpočtu multivrstev ScSi. S rostoucím podílem amorfní složky Si ve vrstvách se výpočet přibližuje k experimentálním průběhům. (5P - Kolacek et al., 2016)

5.7.2. Měření propustnosti Al filtrů pro XUV oblast

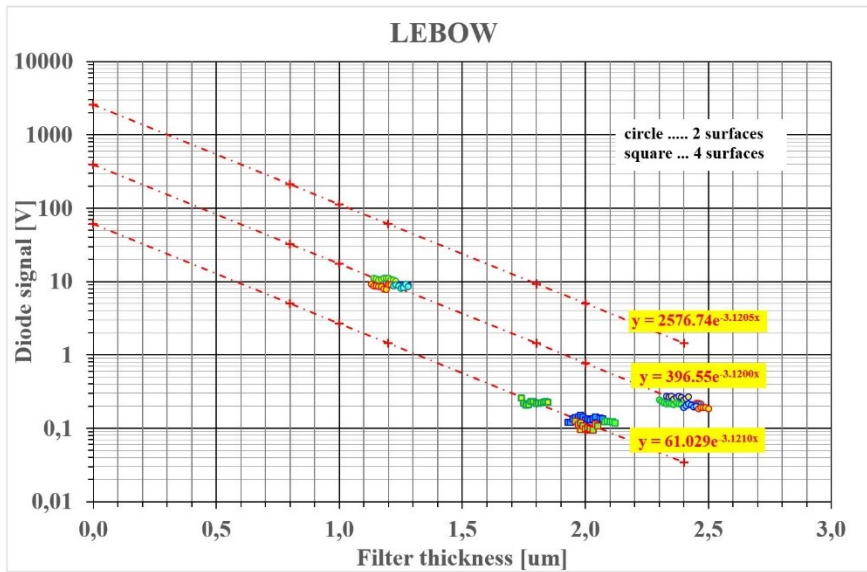
Při zjišťování energie XUV laseru, kterou jsme počítali ze signálu XUV diody, jsme jej potřebovali definovaně zeslabit, aby XUV dioda nebyla v saturaci. Přitom se opakovaně ukázalo, že námi dosud používané Al filtry od firmy GoodFellow vykazují silné nehomogenity a jejich propustnost kolísala i několikanásobně, podle konkrétního místa, na velkoplošné fólii, kterou jsme k vyřezávání filtrů používali. To nás vedlo k nákupu mnohem dražších filtrů od firmy Lebow, které již byly zasazeny v obrubách a zdály se být lépe definované. V praxi se nám to potvrdilo pouze částečně. Reprodukovatelnost jejich tloušťky byla rozhodně mnohem lepší, ale zato se nám několikrát stalo, že skutečná tloušťka zřejmě neodpovídala označení výrobce.

Dále jsme zjistili, že propustnost dvojice filtrů je vždy menší než propustnost jednoho filtru o součtové tloušťce. Přičítáme to vlivu povrchů filtrů, na kterých se utvářejí vrstvy oxidu Al případně i jiné vrstvy, a výsledkem může být podstatné snížení propustnosti. Tím jsme si také vysvětlovali pozorovaný nesouhlas našich měření s tabelovanými hodnotami (Henke et al., 1993). Abychom ověřili hypotézu s vlivem oxidové vrstvy, provedli jsme měření závislosti propustnosti filtrů na jejich nominální tloušťce po dva případy:

1. nominální tloušťka byla realizována jedním filtrem (2 povrchy),
2. nominální tloušťka byla součtem nominálních tlouštěk dvojice filtrů použitých současně (4 povrchy).

Vzhledem k exponenciálnímu útlumu byla pro vyhodnocení experimentů na obr. 5-11 použita logaritmická stupnice. Prvnímu případu odpovídá prostřední proložená přímka a druhému dolní

přímka. Jejich vzdálenost považujeme za vliv rozdílného počtu povrchů. Uděláme-li nad nimi ekvidistantně třetí přímku můžeme ji hypoteticky považovat za závislost, kterou bychom dostali s filtry bez vlivu povrchových vrstev. Jenže ani takto se nedostaneme na tabelované hodnoty propustnosti: pro tloušťku 0.8 μm nám vychází stále 1.8x méně a pro tloušťku 2.4 μm dokonce více než 5x méně. Navíc jsme u některých konkrétních filtrů pozorovali i časově proměnnou propustnost, jako by jejich znečištění postupně narůstalo. Znamená to, že hypotézu s oxidovou vrstvou jsme našimi měřeními ani nepotvrdili, ani nevyvrátili. Uvážíme-li o 28 řádů menší propustnost Al_2O_3 než má čistý hliník (Henke et al.,1993), začíná být zřejmé, že za těchto okolností nelze kvantitativní měření s filtry přeceňovat a jejich výsledky i po eliminování zřejmých vlivů je nutno považovat pouze za orientační.



Obr. 5-11 Měření propustnosti Al filtrů od firmy Lebow. Střední přímka vznikla proložení experimentálních bodů pro jednotlivé filtry (2 povrchy) a dolní přímka je pro dvojice filtrů (4 povrchy). Horní přímka byla vytvořena ekvidistantním posunutím střední přímky jako očekávaný průběh propustnosti pro filtry zbavené povrchových oxidových vrstev.

5.8. Shrnutí aplikací

Základem pro většinu aplikací XUV kapilárního laseru CAPEX na 46.9 nm bylo zvládnutí jeho fokusace, což přineslo zásadní možnost vytváření mikrokráterů do téměř libovolného materiálu. S tím souviselo zpočátku náhodné, později cílené vytváření různých typů nanostruktur a umožnilo to i přímé pozorování interakce XUV laseru s materiálem terče.

Zájem kolegů z jiných pracovišť o exponování vzorků na aparatuře CAPEX postupně vedl k realizaci dalších zajímavých aplikací a s přibývajícimi zkušenostmi se tak rozšiřovaly i aplikační možnosti aparatury.

Zaostřeným laserovým svazkem byly XUV laserovou ablací studovány různé nanostruktury, (P4 a P5 – Kolacek et al., 2012 a 2016), byla testována XUV radiační odolnost speciálních materiálů (P9 – Straus et al, subm. 2018), byla pozorovány fotograficky detailně povrchové efekty během ablace (P1 - Frolov et al., 2016) a proběhly první experimenty s naprašováním speciálních tenkých vrstev.

Se zeslabeným nebo mírně rozostřeným laserovým svazkem byla ověřena možnost ovlivnění magnetických vlastnosti ferromagnetik, jak to naznačily experimenty s tenkými vrstvami Pt(3 μ m)Co(5 μ m)Pt(3 μ m).

S primárním, nefokusovaným svazkem byla provedena metrologická měření v oboru XUV.

Za nejpozoruhodnější výsledek považujeme naměření první teplotní závislosti rychlosti XUV ablace provedené na BaF₂, jejíž interpretace je prozatím ne zcela vyjasněná. Předpokládáme, že nově zavedená možnost expozice vzorků při různých teplotách nalezne širší uplatnění.

6. Závěr

Extrémní ultrafialový argonový kapilární 46.9 nm laser, realizovaný v Ústavu fyziky plazmatu AVČR, v.v.i. jako v pořadí pátý na světě vznikl do značné míry nezávisle na konstrukci prvního i dalších přístrojů tohoto typu. Nevýhodou originálního přístupu jistě byla nesrovnatelně větší pracnost a mnohem delší doba realizace, ale na druhou stranu přinesl některé nové poznatky, které naši předchůdci patrně přehlédli. Konkrétně se jednalo o nedoceněný význam intenzivnějšího předpulzu popsany v kapitole [Režim generace laserujícího plazmatu - předionizace a proud hlavního výboje \(3.5.\)](#) a o dosud nevyužívanou možnost ovlivňování profilu svazku kapilárního XUV laseru, uvedenou v části [Možnosti ovlivňování profilu laserového svazku \(3.5.6\)](#).

Podrobně byla popsána přeměna částečně funkčního laboratorního zařízení na plně funkční XUV laserový zdroj s možností přizpůsobení pro nejrůznější laboratorní aplikace, jež usnadňují speciálně vyvinuté originální pomůcky, které byly též popsány a z nichž některé jsou chráněny užitnými vzory. Praktické aplikace byly popsány stručně s tím, že podrobnosti lze najít v příložených publikacích **P1-P9**, na kterých jsem se podílel.

V posledních letech byl náš XUV laser CAPEX vyhledáván pro expozici vzorků jak kolegy, využívajícími originální Roccův laser zakoupený FZÚ AVČR, v.v.i., tak také kolegy ze zahraničních laboratoří, kteří mají k dispozici další varianty tohoto typu přístroje. Na základě toho lze konstatovat, že cíl práce obsažený v jejím názvu, tedy [Optimalizace impulzního silnoproudého výboje v plynu plněné kapiláře pro aplikační účely](#), byl splněn. Navíc byla realizována řada zmíněných laboratorních aplikací.

V analogii s konvenčními lasery a s přihlédnutím k rostoucí rychlosti technického a technologického pokroku lze předpokládat, že rozsah aplikací XUV laseru může být v blízké budoucnosti mnohem větší, než si nyní dokážeme představit

7. Literatura

BENWARE, B.R., OZOLS, A., ROCCA, J.J., ARTIOUKOV, I.A., KONDRATENKO, V.V. AND VINOGRADOV, A.V. (1999). Focusing of a tabletop soft-x-ray laser beam and laser ablation, *Optics Letters* **24**, p. 1714-1716.

BEN-KISH, A., SHUKER, M., NEMIROVSKY, R.A., FISHER, A., RON, A. AND SCHWOB, J.L. (2001). Plasma Dynamics in Capillary Discharge Soft X-Ray Lasers. *Physical Review Letters* **87** (1), p. 015002-2 to 4.

CAPELUTO, M.G., VASCHENKO, G., GRISHAM, M., MARCONI, M.C., LUDUEÑA, S., PIETRASANTA, C.L., LU, Y., PARKINSON, B., MENONI, C.S. AND ROCCA, J.J. Nanopatterning With Interferometric Lithography Using a Compact $\lambda = 46.9$ -nm Laser. (2006). *IEEE Transactions on Nanotechnology* **5**, No1, p. 3-7.

CELLIERS, P., WEBER, F. DA SILVA, L.B., *et al.* (1995). Fringe Formation and Coherence of a Soft X-ray Beam Illuminating a Mach Zehnder Interferometer. *Optics Letters* **20** (18), p. 1907-1909.

DA SILVA, L.B. *et al.* (1992) X-ray Microscopy of Rat Sperm Nuclei, *Science* **258** (5080), p. 269-271.

EINSTEIN, A. (1917). Quantum theory of Radiation. *Physikalische Zeitschrift* **18**, p. 121-128.

HAYASHI, Y., XIAO, Y., SAKAMOTO, N., MIYAHARA, H., NIIMI, G., WATANABE, M., OKINO, A., HORIOKA, K. AND HOTTA, E. (2003). Performances of Ne-like Ar Soft X-ray Laser using Capillary Z-Pinch Discharge. *Japanese Journal of Applied Physics* **42**, p. 5285-5289.

HENKE, B.L., GULLIKSON, E.M. AND DAVIS, J.C. (1993) X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50$ -30000 eV, $Z=1$ -92, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **54** (2), p.181-342

JUHA, L., BITTNER, M., CHVOSTOVA, D., KRASA, J., OTCENASEK, Z., PRÄG, A.R., ULLSCHMIED, J., PIENKA, Z., KRZYWINSKI, J., PELKA, J.B., WAWRO, A., GRISHAM, M.E., VASCHENKO, G., MENONI, C.S. AND ROCCA, J.J. (2005). Ablation of organic polymers by 46.9-nm-laser radiation, *Applied Physics Letters* **86**, p. 034109/1-3.

KASUYA, K., MOTOKOSHI, S., TANIGUCHI, S., NAKAI, M., TOKUNAGA, K., KOLACEK, K., SCHMIDT, J., FROLOV, O., STRAUS, J., MATEJICEK, J., CHOUKOUROV, A. (2016) Ablation-erosion analyses of various fusion material surfaces... *XXI International Symposium on High Power Laser System and Applications* **10254**, p. 1B1-6.

KEY, M.H., BARBEE, J.R., DA SILVA L B, GLENDINNING, S.G., KALANTAR, D.H., ROSE, S.J., WEBER, S.V. (1995). New Plasma Diagnostic Possibilities from Radiography with X.U.V. Lasers. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **54**, p. 221-226.

KOLACEK, K., SCHMIDT, J., BOHACEK, V. *et al.* (2002). Dominating spectral line at the wavelength of laser-transition in X-ray spectrum of the fast gas-filled-capillary discharge. *Czechoslovak Journal of Physics* **52**, (Suppl. D), p. 199-204.

LUAN, B., ZHAO, Y., WANG, Q., CHENNG, Y., XIE, Y. (2007). A New Discharge Scheme of a Prepulse Plus Two Main Pulses for Capillary-Discharge Soft-X-Ray Laser. *Chinese Physics Letter* **24** (6), p. 1580-1582.

MATTHEWS, D.L., HAGELSTEIN, P.L., ROSEN, M.D., ECKART, M. J., CEGLIO, N.M., HAZI, A. U., MEDECKI, H., MACGOWAN, B. J., TREBES, J.E., WHITTEN, B.L., CAMPBELL, E.M., HATCHER, C.W., HAWRYLUK, A.M., KAUFFMAN, R.L., PLEASANCE, L.D., RAMBACH, G., SCOFIELD, J.H., STONE, G. AND WEAVER, T.A. (1985). Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier. *Physical Review Letters* **54** (2), p. 110-113.

NIIMI, G., HAYASHI, Y., SAKAMOTO, N., NAKAJIMA, M., OKINO, A., WATANABE, M., HORIOKA, K. AND HOTTA, E. (2002). Development and Characterization of a Low Current Capillary Discharge for X-ray Laser Studies. *IEEE Transaction on Plasma Science* **30** (2), p. 616-621.

NIIMI, G., HAYASHI, Y., NAKAJIMA, M., WATANABE, M., OKINO, A., HORIOKA, K. AND HOTTA, E. (2001). Observation of multi-pulse soft x-ray lasing in a fast capillary discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics* **34**, p. 2123–2126.

ROCCA, J.J., MORENO, C.H., MARCONI, M.C. AND KANIZAY, K. (1999). Soft-x-ray laser interferometry of a plasma with a tabletop laser and Lloyd's mirror. *Optics Letters* **24**, p. 420-422.

ROCCA, J.J., SHLYAPTSEV, V., TOMASEL, F.G., CORTAZAR, O.D., HARTSHORN, D. & CHILLA, J.L.A. (1994). Demonstration of a discharge pumped table-top soft X-ray laser. *Physical Review Letters* **73** (16), p. 2192-2195.

SEMINARIO, M., ROCCA, J.J., DEPINE, R.A., BACH, BENNY. AND BACH, BERNIE (2001). Characterization of diffraction gratings by use of a tabletop soft x-ray laser. *Applied Optics* **40**, p. 5539-5544.

SCOFIELD, J.H., STONE, G. AND WEAVER, T.A., (1985). Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier. *Physical Review Letters* **54** (2), p. 110-114.

SHUKER, M, BEN-KISH, A., NEMIROVSKY, R.A., FISHER, A. AND RON, A. (2006). The effects of the prepulse on capillary discharge extreme ultraviolet laser. *Physics of Plasmas* **13**, p. 013102/1-4.

TOMASSETTI, G., RITUCCI, A., REALE, A., PALLADINO, L., REALE, L., KUHLEVSKY, S.V., FLORA, F., MEZI, L., KAISER, J., FAENOV, A. AND PIKUZ, T. (2002). Capillary discharge soft X-ray lasing in Ne-like Ar pumped by long current pulses. *European Physical Journal D: Applied Physics* **19**, p. 73-77.

TREBES, J.E.; BROWN, S.B.; CAMPBELL, E.M. *et al.*, (1987). Demonstration of X-Ray Holography with an X-Ray Laser. *Science* **238** (4826), p.517-519.

VASCHENKO, G., ETXARRI, A.G., MENONI, C.S., ROCCA, J.J., HEMBERG, O., BLOOM, S., CHAO, W., ANDERSON, E.H., ATTWOOD, D.T., LU, Y. AND PARKINSON, B. (2006). Nanometer scale ablation with a table-top soft x-ray laser. *Optics Letters* **31** (24), p. 3615-3617.

VASCHENKO, G., BRIZUELA, F., BREWER, C., GRISHAM, M., MANCINI, H., MENONI, C.S., MARCONI, M.C., ROCCA, J.J., W. CHAO, LIDDLE, J., E.H. ANDERSON, D.T. ATTWOOD, A.V. VINOGRADOV, I.A., ARTIOUKOV, Y.P., PERSHYN, AND V.V. KONDRATENKO (2005). Nanoimaging with a compact extreme-ultraviolet laser. *Optics Letters* **30**, p. 2095-2097.

WACHULAK, P.W., MARCONI, M.C., BARTELS, R.A., MENONI, C.S. AND ROCCA, J.J. (2008). Soft x-ray laser holography with wavelength resolution. *Journal of the Optical Society of America, B* **25** (11), p. 1811-1814.

WACHULAK, P.W., CAPELUTO, M.G., MARCONI, M.C., PATEL, D., MENONI, C.S. AND ROCCA, J.J. (2007). Nanoscale patterning in high resolution HSQ photoresist by interferometric lithography with table top EUV lasers. *Journal of Vacuum Science and Technology* **25** (6), p. 2094-2097.

WACHULAK, P.W., BARTELS, R.A., MARCONI, M.C., MENONI, C.S., ROCCA, J.J., LU, Y. AND PARKINSON, B. (2006). Sub 400 nm spatial resolution extreme ultraviolet holography with a table top laser. *Optics Express* **14** (21), p. 9636-9642.

Wilson, R.R. (1941). A vacuum-tight sliding seal. *Review of Scientific Instruments* **12** p. 91. <https://doi.org/10.1063/1.1769836>.

8. Patentová literatura

Užitný vzor, STRAUS, J., SCHMIDT, J., FROLOV, O., KOLÁČEK, K. (2016). Monitorovací zařízení energie laserového pulzu v extrémní ultrafialové/měkké rentgenové oblasti. **CZ 29600 U1**.

Užitný vzor, KOLÁČEK, K., FROLOV, O., MELICH, R., PRUKNER, V., SCHMIDT, J., ŠTRAUS, J., (2014). Interferometr pro extrémní ultrafialovou oblast. **CZ 26782 U1**.

US patent, STRAUS, J. (1997) Method for carrying out cryosurgical intervention and device for this method. **US005667505A**.

9. Přílohy - Vlastní publikace

P1 - FROLOV, O., KOLACEK, K. SCHMIDT, J. STRAUS, J., CHOUKOUROV, A., PIRA, P. (2016). Ablation of LiF and CsI by EUV Nanosecond Laser Pulse. *Proceedings of the 15th International Conference on X-ray Lasers, Springer Proceedings on Physics* **202**, p. 321-331.

P2 - HÜBNER, J., VRBA, P., STRAUS, J., JANCAREK, A., NEVRKLA, M. (2012) Dynamics of pre-ionized fast capillary discharge, *Physica Scripta* **T161**, p. 014047/1-5

P3 - KOLACEK, K., SCHMIDT, J., BOHACEK, V., RIPA, M., FROLOV, O., VRBA, P., STRAUS, J., PRUKNER, V., RUPASOV, A.A. AND SHIKANOV, A.S. (2008). Amplification of Spontaneous Emission of Neon-Like Argon in a Fast Gas-Filled Capillary Discharge. *Plasma Physics Reports* **34** (2), p. 162–168.

P4 - KOLACEK, K., STRAUS, J., SCHMIDT, J., FROLOV, O., PRUKNER, V., SHUKUROV, A., HOLY, V., SOBOTA, J., AND FORT, T. (2012). Nano-structuring of solid surface by extreme ultraviolet Ar⁸⁺ laser. *Laser and Particle Beams*, Volume **30** (01), p. 57-63.

P5 - KOLACEK, K., SCHMIDT, J., STRAUS, J., FROLOV, O., PRUKNER, V., MELICH, R. AND PSOTA, P. (2016). Spontaneous and artificial direct nanostructuring of solid surface by extreme ultraviolet laser with nanosecond pulses. *Laser and Particle Beams* **34** (01), p. 11-22.

P6 - STRAUS, J., KOLACEK, K., BOHACEK, V., FROLOV, O., PRUKNER, V., RIPA, M., SEMBER, V., SCHMIDT, J., VRBA, P. AND KLIR, D. (2004) Interactive System for the Interpretation of Atomic Spectra. *Proceedings of the 21st Symposium on Plasma Physics and Technology, 21 SPPT, Prague, Czech Republic, June 14-17, 2004, Czechoslovak Journal of Physics* **54** (Suppl. C), p. C314-C320.

P7 - STRAUS, J., KOLACEK, K., BOHACEK, V., FROLOV, O., PRUKNER, V., SCHMIDT, J., VRBA, P., WEINZETTL, V. (2005). Application of the Interactive system for the Atomic Spectra Interpretation to the Argon-Filled-Capillary Discharge. in *Proceedings of the 6th International Conference on Dense Z-Pinches, Oxford, Ed. by J. Chittenden, AIP Conference Proceedings* **808**, p. 259-262.

P8 - STRAUS, J., KOLACEK, K., NEUFUSS, K., KOLMAN, B., DUBSKY, J., FROLOV, O., SCHMIDT, J., PRUKNER, V. (2006). Modification of alumina-capillary inner-surface by pulse high-current discharge. in *Proceedings of the 22st Symposium on Plasma Physics and Technology, Prague. Czechoslovak Journal of Physics* **56** (Suppl. B), p. B259-B266.

P9 - STRAUS, J., KOLACEK, K., KOLACEK, K. SCHMIDT, FROLOV, O., VILEMOVA, M., MATEJICEK, J., JAGER, A., JUHA, L., TOUFAROVA, M., CHOUKOUROV, A, KASUYA, K. (subm. 2018) Response of fusion plasma facing materials to nanosecond pulses of extreme ultraviolet radiation. *Laser and Particle beams* – Submitted.