

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ČASOVĚ A PROSTOROVĚ ROZLIŠENÁ DIAGNOSTIKA ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

TEMPORALLY AND SPATIALLY RESOLVED DIAGNOSTICS OF AN ELECTRIC ARC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Oldřich Holcner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Petr Kloc, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Oldřich Holcner

ID: 171859

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Časově a prostorově rozlišená diagnostika elektrického oblouku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. V předpřipravené výbojové komoře proveďte opakované měření vlastností elektrického oblouku pro různé hodnoty elektrického proudu procházejícího tímto obloukem.
2. Zaznamenejte vývoj optického spektra emitovaného obloukem v různých bodech podél osy experimentální komory.
3. Naměřená optická spektra zpracujte, včetně potřebné kalibrace použitých přístrojů.
4. Stanovte vývoj rozložení teploty jednotlivých elektrických oblouků s ohledem na jejich další fyzikální vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] GRIEM, Hans R. Plasma Spectroscopy. New York: McGraw-Hill Book, 1964.
- [2] RAJZER, Jurij Petrovič. Gas discharge physics. 1st edition 1991, corrected 2nd printing 1997. Berlin: Springer, 1991. ISBN 978-3-642-64760-4.
- [3] FANTZ, U. Basics of plasma spectroscopy. Plasma Sources Science and Technology. 2006, 15(4), S137-S147 [cit. 2016-10-24]. DOI: 10.1088/0963-0252/15/4/S01. ISSN 0963-0252.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Mgr. Petr Kloc, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce "Časově a prostorově rozlišená diagnostika elektrického oblouku" se zabývá zkoumáním teploty plazmatu v oblouku, který vznikl přetavením měděného drátu. Jedná se o optickou metodu na základě určení teploty z intenzity spektrálních čar. V této bakalářské práci vysvětlíme, jak vznikají spektrální čáry a jak se podle nich dá určit teplota. V praktické části zpracujeme výboje a ukážeme časový vývoj teploty v měřených bodech.

KLÍČOVÁ SLOVA

Plazma, Elektrický výboj, Teplota, Optická metoda

ABSTRACT

This bachelor thesis "Temporally and spatially resolved diagnostics of an electric arc" deals with the investigation of plasma temperature in an arc formed by evaporation of copper wire. It is an optical method based on determination of temperature from intensity of spectral lines. In this bachelor thesis we explain how spectral lines are formed and how to determine the temperature. In the practical part we process discharge and show the time evolution of temperature at the measured points.

KEYWORDS

Plasma, Electric discharge, Temperature, Optical method

HOLCNER, Oldřich. *Časově a prostorově rozlišená diagnostika elektrického oblouku*. Brno, 2020, 77 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Mgr. Petr Kloc, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Časově a prostorově rozlišená diagnostika elektrického oblouku“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Mgr. Petr Kloc Ph.D. za jeho čas, připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

Úvod	17
1 Teoretická část	19
1.1 Atom vodíku	19
1.2 Elektrický výboj	20
1.2.1 Korónový výboj	22
1.2.2 Doutnavý výboj	22
1.2.3 Obloukový výboj	22
1.3 Plazma	24
1.3.1 Diagnostika plazmatu	24
2 Praktická část	31
2.1 Výbojová komora	31
2.2 Kalibrace	35
2.3 Měření a zpracování dat obloukového výboje	37
2.3.1 První měření	41
2.3.2 Druhé měření	44
2.3.3 Třetí měření	47
Závěr a diskuze chyb	51
Literatura	55
Seznam příloh	57
A Grafy teplot	59
A.0.1 První měření	59
A.0.2 Druhé měření	60
A.0.3 Třetí měření	69

Seznam obrázků

1.1	Rozdělení typu výbojů.	21
1.2	Energetické hladiny v atomu	27
1.3	Normované Gaussova a Lorentzova funkce	30
2.1	Výbojová komora - původní část	32
2.2	Výbojová komora - zakrácená strana	32
2.3	Výbojová komora - zakrácená strana pohled z horizontální strany	33
2.4	Držák na upevnění optických kapelů	34
2.5	Výbojová komora - finalní stav	34
2.6	Data od výrobce pro kalibraci y-ové osy	37
2.7	Ukázka naměřených dat	38
2.8	Ukázka prokládání dat	39
2.9	Záznam napětí a proudu v čase (První měření)	41
2.10	Průběh teploty v čase (První měření)	43
2.11	Záznam napětí a proudu v čase (Druhé měření)	44
2.12	Grafické znázornění časového průběhu teploty oblouku ve všech měřených bodech pro druhé měření	45
2.13	Záznam napětí a proudu v čase (Třetí měření)	47
2.14	Grafické znázornění časového průběhu teploty oblouku ve všech měřených bodech pro třetí měření	48
A.1	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro první měření.	59
A.2	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření levý horní roh.	60
A.3	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření horní střed.	61
A.4	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření pravý horní roh.	62
A.5	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření levá prostřední část.	63
A.6	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření prostřední střed.	64
A.7	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření pravý prostřední část.	65
A.8	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření levý dolní roh.	66
A.9	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření dolní střed.	67
A.10	Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření pravý dolní roh.	68

A.11 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření levý horní roh.	69
A.12 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření horní střed. .	70
A.13 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření pravý horní roh.	71
A.14 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření levá prostřední část.	72
A.15 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření prostřední střed.	73
A.16 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření pravý prostřední část.	74
A.17 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření levý dolní roh.	75
A.18 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření dolní střed. .	76
A.19 Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření pravý dolní roh.	77

Seznam tabulek

2.1	Energie a konstanty pro atomární čáry získané z [1].	39
2.2	Tabulka hodnot teplot a jejich chyb v průběhu času pro první měření. . . .	42
2.3	Tabulka hodnot teplot a jejich chyb v průběhu času pro druhé měření. Rozložení tabulky odpovídá grafickému znázornění v grafu 2.14.	46
2.4	Tabulka hodnot teplot a jejich chyb v průběhu času pro třetí měření. Rozložení tabulky odpovídá grafickému znázornění v grafu 2.17.	49

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním teploty plazmatu v oblouku, který vznikl přetavením měděného drátu. Jedná se o optickou metodu na základě určení teploty z intenzity spektrálních čar. V této bakalářské práci vysvětlíme, jak vznikají spektrální čáry, a jak se podle nich dá určit teplota. V praktické části zpracujeme výboje a ukážeme časový vývoj teploty v měřeném bodu.

Nejprve si v teorii ukážeme, jak vznikají spektrální čáry a vysvětlíme si, co jsou energetické hladiny u atomů. Poté si vysvětlíme, jak můžeme zapsat energii, která se uvolní pomocí fotonu, když elektron přejde z excitovaného stavu na nižší hladinu. Zavedeme, jak můžeme přepočítat frekvenci fotonu na vlnovou délku. V další části si vysvětlíme, co znamená elektrický výboj a zavedeme tři neznámější elektrické výboje. Povíme si, jak vzniká korónový výboj, a kde se s ním můžeme setkat. Následně si popíšeme doutnavý a obloukový výboj. Jelikož v praktické části měříme obloukový výboj, tak se mu budeme v teorii věnovat více. Poslední části teoretického úvodu bude zavedení pojmu plazma. Popíšeme si definici plazmatu a vysvětlíme si ji. Dále se podíváme na jednotlivé metody diagnostiky plazmatu. Ty si následně popíšeme a ukážeme, k jakým měřením jsou vhodná, a k jakým jsou nevhodná.

V praktické části si ukážeme výrobu výbojové komory a požadavky na výbojovou komoru. Následně si vysvětlíme funkci spektroskopu, a jaké se musí dělat kalibrace, abychom mohli naměřená data správně zpracovat. Popíšeme dvě základní kalibrace, které jsme dělali, a to kalibraci x-ové a y-ové osy. Poté si ukážeme, jak jsme zpracovali naše naměřená data. Popíšeme si postup měření a zpracování naměřených dat. Naměřená data vyhodnotíme a ukážeme si výsledný průběh teploty v čase.

1 Teoretická část

V teoretické části si vysvětlíme základní pojmy, postupy a mimojiné jak zpracovávat naměřená data, abychom mohli určit teplotu pomocí optické diagnostiky. Vysvětlíme si na nejjednodušším prvku, a to na atomu vodíku, co jsou to elektronové obaly a co se děje, když elektron mezi nimi přeskakuje. Dále se podíváme a rozdělíme si druhy elektrických výbojů. Na závěr se podíváme na plazma a na optickou diagnostiku a na určení teploty z intenzity spektrálních čar.

1.1 Atom vodíku

V této části si na příkladu vodíku vysvětlíme, co se děje, když elektron změní elektronový orbital. Zavedeme si základní vzorce pro výpočet energie záření. Tato část byla vypracována na základě informací ze zdrojů [1, 2].

Nejjednodušším a nejlhčím prvkem v periodické tabulce je vodík. Tvoří převážnou část hmoty ve vesmíru. Jedná se o bezbarvý a lehký plyn bez chuti a zápachu. Vodík má jeden elektron, a proto se na tomto prvku nejjednodušeji ukazují přechody mezi jeho elektronovými orbitaly.

V roce 1900 dospěl Max Planck k závěru, že energie se vyzařuje v kvantech a zavedl konstantu h , která po něm nese jeho jméno Plánkova konstanta. Energie, která je předána fotonem, je dána právě touto konstantou a frekvencí. Matematicky je zapsán takto:

$$E = h \cdot f, \quad (1.1)$$

kde E je energie, která se předá fotonem na frekvenci f . Dále si musíme uvědomit, že vázaný elektron v atomu nemůže mít libovolnou energii, ale nachází se právě na elektronových orbitalech. Platí, že elektronové orbitaly se zaplňují od nejnižších vrstev. Jelikož má vodík právě jeden elektron, je jasné, že tento elektron bude v základním stavu na nejnižší hladině. Pokud elektronu dodáme energii potřebnou k přestupu na vyšší orbit, tak elektron opustí svoji původní hladinu a přeskočí na hladinu vyšší. Tato hladina se nazývá excitovaný stav elektronu. Jelikož se elektron může nacházet jen na povolené hladině v elektronovém obalu, musíme mu dodat přesnou energii k jeho excitaci. Excitovaný stav je pro elektron nestabilní a po určité době má tendenci zase klesnout do svého základního stavu. Pokud bychom uvažovali, že se elektron nenacházel na první excitované hladině, ale až na druhé nebo vyšší, tak může nastat následující situace. Elektron může sestupovat po jednotlivých hladinách a vyzařovat postupně energii, nebo sestoupit rovnou o více hladin, popřípadě rovnou do základního stavu, a vyzařit všechnu energii zároveň. Takto může vzniknout více

spektrálních čar, tedy fotonů o dané frekvenci. Ať nastane jakýkoliv případ, tak se budou vyzářovat fotony o frekvenci dané změnou energie mezi dvěma hladinami elektronového orbitalu. Nikdy se nemůže stát, že by se vyzářily fotony na všech frekvencích.

Nyní je zřejmé, že každý prvek podle uspořádání svého elektronového obalu bude mít jiné vlnové délky, kde bude foton uvolněn. Soubor všech vlnových délek pro daný prvek se nazývá spektrum. Může se stát, že budou některé frekvence dvou fotonů stejné, ale pokud proměříme více stavů, tak najdeme odlišnosti mezi těmito prvky. Pokud tedy dokážeme změřit spektrum prvku do více spektrálních čar, pak můžeme určit o jaký prvek se jedná.

Pokud dodáme prvku větší energii, než aby elektron vystoupal na poslední vázaný stav atomu, tak bude mít elektron dostatečnou energii, aby se uvolnil z elektronového obalu atomu. Takováto frekvence se nazývá mezní frekvence a je pro prvek jiná. Toto platí i pro excitaci elektronu na vyšší hladinu, pokud nedodáme prvku přesně definovanou energii, tak elektron nepřeskočí do excitovaného stavu.

Teď si zavedeme převod mezi frekvencí a vlnovou délkou, která se používá častěji. Světlo šířící se prostředím můžeme zapsat jako vlnu. Jelikož se bavíme o fotonech, které mají rychlost světla označovanou jako c . Můžeme zapsat vlnovou délku λ pomocí rovnice:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.2)$$

Pokud dosadíme do rovnice 1.1 můžeme vyjádřit energii následujícím vztahem:

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}, \quad (1.3)$$

což odpovídá energii fotonu a tento vztah budeme požívat v následujících kapitolách. Vlnová délka je přehlednější i z toho důvodu, že když se bavíme o světle a jeho viditelném spektru, tak se zmiňuje vlnová délka 380 nm až 780 nm. Pro představu rozmezí viditelného spektra zapsaného pomocí frekvence je $3,85 \cdot 10^{14}$ Hz až $7,89 \cdot 10^{14}$ Hz.

1.2 Elektrický výboj

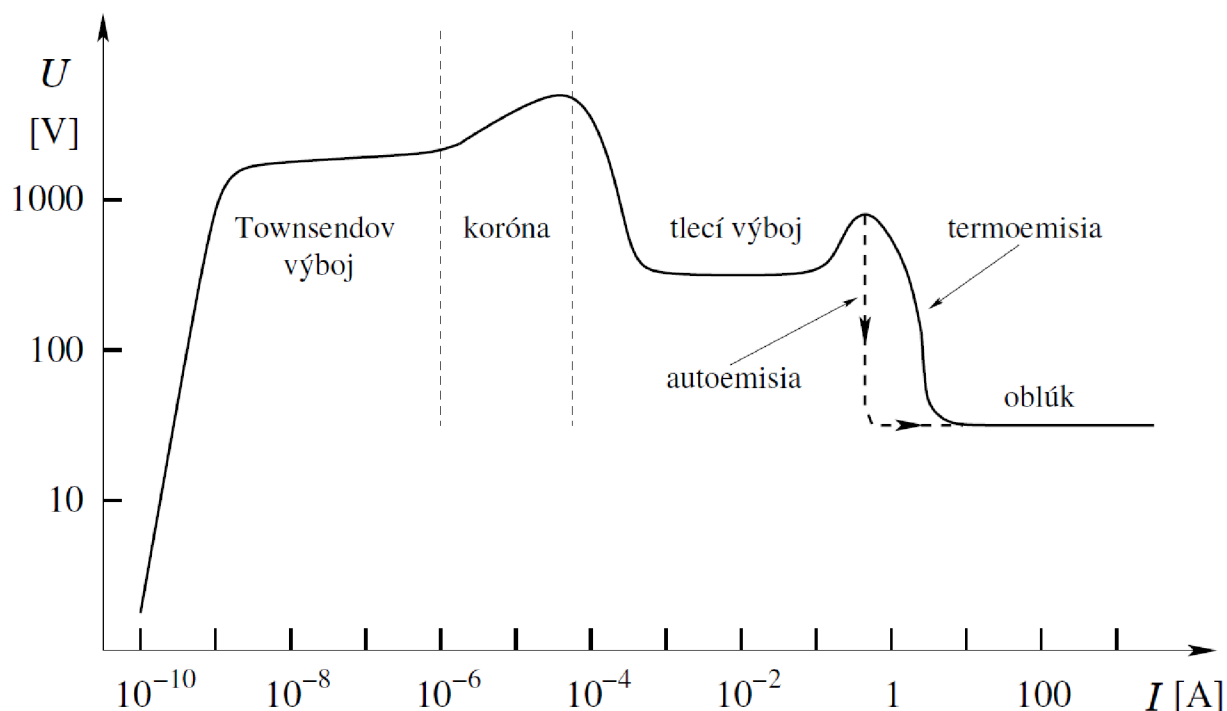
V této kapitole si vysvětlíme co je to elektrický oblouk, kdy může vzniknout a na závěr si povíme něco o základních druzích elektrických výbojů. Tato kapitola byla vypracována na základě informací ze zdrojů [3, 4, 6].

S elektrickým obloukem se můžeme setkat v praxi nejčastěji při spínání nebo rozepínání kontaktu. Při zapínání se přibližují kontakty k sobě a může nastat situace, kdy mezi kontakty je napětí, které přesáhne elektrickou pevnost a dojde k zapálení oblouku. Pokud teče obvodem nějaký proud a my musíme odpojit zdroj od zbytku obvodu, může nastat

situace, kdy se při oddalování zahřejí kontakty a jejich vypařování způsobí zapálení oblouku mezi kontakty, což ohřeje kontakty ještě více a elektrická pevnost mezi kontakty se razantně zmenší. Části elektrod se začnou odpařovat a vytvářejí plyn, který zlepší vodivost, a obvodem tak začne znovu proudit proud.

To je z hlediska vypínání nepříznivý jev a snažíme se s ním co nejlépe vypořádat. Proto mají výkonové vypínače podpurnou složku, jako například plyn SF_6 , který má ideální zhasínací schopnost. Dále se dělají vypínače olejové, kde se přes olej ochlazuje oblouk a při určité teplotě sám zhasne. Dalším způsobem jsou vakuové vypínače, které díky malé koncentraci plynu nedovolí zažehnutí oblouku.

Dalším způsobem, jak se vypořádat s oblouky jsou zhasínací komory, například v jističích, kde je oblouk pomocí elektromagnetické síly vehnán do takové komory, čímž se zvětší jeho dráha. Dále se v komoře nachází žebra, která oblouk rozdělí na menší části, čímž se zvětší odpor a oblouk zhasne. Je vidět, že se s problémem elektrických oblouků setkáváme v elektrice běžně a musíme si umět s nepříznivými jevy poradit.



Obr. 1.1: Oblasti existence jednotlivých typů výbojů a evoluce mezi nimi [6].

1.2.1 Korónový výboj

Korónový výboj, zkráceně korona, existuje pouze v nehomogenním poli. V homogenním poli není tak stabilní a přechází do jiného druhu výboje, a to do doutnavého nebo obloukového výboje. Korónový výboj nejčastěji vzniká v místech, kde má jedna z elektrod malý poloměr křivosti. Této elektrodě se pak říká korunující elektroda. Tento druh výboje je specifický v tom, že nedochází k průrazu elektrické pevnosti mezi elektrodami. Výboj tedy vzniká jen v okolí korunující elektrody. Pokud bychom zvedali napětí mezi elektrodami tak by se prodlužoval i tento výboj, až by přeskočil mezi elektrodami a vznikl by doutnavý nebo obloukový výboj. Můžeme tedy tvrdit, že korona je za určitých okolností představ výboje doutnavého nebo obloukového. Zároveň se ale jedná o samostatný výboj, protože po jeho zapálení existuje korona i bez vnějšího zdroje elektronů.

V praxi se nejčastěji setkáváme s korónovým výbojem v distribuční sítí a to při napětích 220 kV, 440 kV a další. Korónový výboj na vedení 220 kV vzniká při slabém dešti. Jedná se o nežádoucí jev v okolí vodičů vedení. Při korónovém výboji dochází ke ztrátám na vedení, čehož se snažíme v praxi vyvarovat třeba tím, že jsou vodiče vedení vedeny ve třech vodičích v rovnostranném trojúhelníku. Tímto uspořádáním se zvětší efektivní poloměr korunující elektrody, a tím pádem se zmenší intenzita elektrického pole. Dále se proti tomuto výboji můžeme bránit zvětšením velikosti vodiče, zvětšením vzdálenosti mezi vodiči, nebo použitím korónových kroužků.

1.2.2 Doutnavý výboj

S doutnavým výbojem při atmosférickém tlaku se můžeme setkat při malých proudech. Pro tento typ výboje jsou typické tlaky v rozmezí 1 až 10 000 Pa a proudy v rozmezích 0,1 až 100 mA. Pokud by elektrodami protékal větší proud, elektrody by se zahřály a výboj by přešel do obloukového výboje. Délka doutnavých výbojů závisí na tlaku a druhu plynu ve kterém se nachází. Stejně tak je závislé i napětí na materiálu elektrod, které může dosahovat 80 až 400 V. Doutnavý výboj, narozdíl od korónového výboje, spojuje jak anodu, tak katodu. U katody vznikají místa s nadbytkem kladného náboje a u anody pak místa s nadbytkem záporného náboje.

1.2.3 Obloukový výboj

Obloukový výboj (v praxi se nazývá obloukem) začíná hořet při nízkém tlaku až do rozmezí MPa a při proudech větších jak 1 A. Přesná hodnota proudu závisí na materiálu katody a anody. Jelikož se jedná o poslední druh výboje, není určen maximální proud

a maximální tlak, při kterém obloukový výboj může existovat. Velká vodivost obloukového výboje způsobuje to, že při hoření obloukového výboje není potřeba vysoké napětí mezi katodou a anodou. Platí, že při zvyšování tlaku nastává kontrakce výboje a objevuje se radiální gradient teploty nabitých částic i molekul plynu. Při atmosférickém tlaku platí, že všechny složky plazmatu mají stejnou teplotu a jsou ve stavu, který můžeme považovat za stav termodynamické rovnováhy. Díky tomuto předpokladu můžeme vypočítat koncentraci nabitých částic a teplotu.

S tímto typem výboje se v praxi setkáváme při vypínání a zapínání obvodů. Pokud v obvodu vznikne zkrat a je potřeba obvod odpojit od sítě, tak k tomuto účelu slouží jistící prvky. V těchto jistících prvcích může vzniknout obloukový výboj. Pokud obloukový výboj vznikne, tak propojí obvod, protože vede proud, a naše snaha o rozpojení je zbytečná a je potřeba oblouk uhasit. Při hoření obloukového výboje dochází rovněž k tavení materiálu, ze kterých jsou zkonstruovány kontakty. Může se stát, že při dalším zapnutí nebudou kontakty na sebe dobře doléhat. Pokud dojde k zapnutí před tím, než kontakty zchladnou, může dojít k jejich stavení dohromady. Proto je potřeba obloukový výboj co nejdříve uhasit. K tomu slouží samotná konstrukce jistících prvků. Například jistič má speciální komoru, do které se při vypínání pomocí elektromagnetické síly oblouk nažene. Tím se zvýší jeho délka a zvětší plocha, která je ochlazována okolím. Následně se zvětší odpor obloukového výboje a sníží se proud protékající obloukovým výbojem až zanikne. Dále jsou v této komoře kovová žebra, která způsobí to, že se obloukový výboj rozdělí na menší části a rychleji pak zhasne, z důvodu zvětšeného odporu. Dalším jistícím prvkem jsou výkonové vypínače, které musí umět vypnout nadproudy. U těchto jistících prvků se využívá prostředí, ve kterém je uložen kontakt, tedy anoda a katoda. Jedná se o kontakty uložené v oleji, v plynu SF₆ anebo ve vakuových vypínačích. U vypínačů s olejem nebo plynem SF₆ se využívá prostředí, které obloukový výboj ochladí a tím pádem se zvětší odpor a klesne vodivost obloukového výboje. U vakuového vypínače se využívá skutečnosti, kdy mezi kontakty není žádné medium, přes které by mohlo docházet k průtoku proudu. Oblouk tedy může vzniknout jen za předpokladu, že se odpaří materiál z kontaktu, který by následně sloužil jako medium k vedení proudu.

1.3 Plazma

V této části si vysvětlíme základy plazmatu, včetně toho, co plazma je. V posledních částech si vysvětlíme způsoby měření teploty plazmatu. Tato část byla vypracována na základě informací ze zdrojů [1, 5, 6, 7, 8].

Když se lidé baví o plazmatu, často zmiňuje, že se jedná o čtvrtý stav hmoty. Základní tři stavy známe. Jedná se o pevnou, kapalnou a plynnou hmotu. S těmito třemi hmotami se setkáváme běžně a každý je zná. Nicméně většina hmoty ve vesmíru je tvořena právě tímto čtvrtým stavem hmoty, což je plazma. Co tedy plazma je?

Definice říká: "Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic vykazující kolektivní chování." (F. F. Chen, str. 19)[7]

Pojďme si rozebrat některá slova z definice. Jako první se podíváme, co znamená kvazineutralita. Jedná se o stav, který je blízký neutralitě. To znamená, že plyn obsahuje přibližně stejný počet protonů jako elektronů. Zároveň není ovšem tak neutrální, aby zmizely všechny zajímavé elektromagnetické síly. Nyní si vysvětlíme, co znamená kolektivní chování. Nabyté částice ovlivňují pohyb dalších nabitých částic na poměrně velkou vzdálenost. Na začátku jsme zmiňovali, že se jedná o nejvíc rozšířenou hmotu ve vesmíru. Je to způsobeno hlavně tím, že plazma můžeme najít mimo jiné ve hvězdách, ve slunečním větru, v zářivkách, ve fúzních reaktorech jako jsou tokamaky a tak dále. Teď, když jsme si vysvětlili, jak můžeme chápat plazma, podíváme se na to, jak můžeme určovat jednotlivé charakteristiky plazmatu.

1.3.1 Diagnostika plazmatu

Mezi základní parametry plazmatu lze rozdělit na makroparametry a mikroparametry. Mezi makroparametry můžeme zahrnout například tlak, intenzitu elektrického pole, proud a další. Mezi mikroparametry můžeme zařadit koncentraci, teplotu, a atd. Popisované veličiny můžeme měřit různými metodami. Tyto metody se mohou dělit na metody aktivní a pasivní. Metody aktivní jsou takové, které během měření mají kontakt s plazmatem nebo ho ovlivňují. Naopak metody pasivní jsou takové, které během měření nemají přímý kontakt s plazmatem s jsou takzvaně bezkontaktní. Pokud chceme měřit některý z výše zmíněných parametrů, musíme si nejprve uvědomit, zda je možné do plazmatu přivést nějakou sondu, nebo zda měření probíhá z technických důvodů v určité vzdálenosti, jako je například kryt přístroje a tak dále. Když víme, jaké bude uspořádání měření, musíme si uvědomit, které parametry budou zajímavé k měření, a které nikoliv. Nyní si ukážeme některé metody a ukážeme si k čemu jsou vhodné.

Sondové metody

Jednou z nejstarších metod je zkoumání parametru pomocí sondy. Jedná se o aktivní metodu, tedy sonda zasahuje přímo do měřeného plazmatu, proto musíme dbát na to, aby samotná sonda plazma co nejméně ovlivnila. Proto klademe na sondu vysoké požadavky jako například tvar sondy, materiál, ze kterého je sonda vyrobena a velikost samotné sondy. Nejčastěji se používají tři druhy sond rovinná, válcová neboli cylindrická a kulová neboli sférická. jako materiál se většinou volí wolfram někdy i platina.

Sonda měří parametry v místě, kde se nachází. Měření sondou probíhá tak, že se na sondu přivede napětí a jeho změnou můžeme při měření proudu vynést voltampérovou charakteristiku, kterou nazýváme sondová charakteristika. Pokud naměřenou závislost zlogaritmujeme, tak můžeme ze směrnice určit teplotu plazmatu. Na základě této znalosti pak můžeme určit koncentraci elektronu. Pokud bychom chtěli určovat i napětí v plazmatu, tak musíme použít dvě sondy. Pak jsme schopni určit napětí mezi sondami.

Výpočet teploty můžeme určit z následující rovnice:

$$\ln I_- = \ln I_{-p} + \frac{e(U - U_p)}{kT_-}, \quad (1.4)$$

kde I_- je proud sondou, I_{-p} je nasycený elektronový proud, U_p je potenciál plazmatu a k je Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota. Vidíme, že se jedná o přímku se směrnici e/kT_- . Pokud jsme tedy schopni vyjádřit si více bodu, následně proložit přímkou, tak z její směrnice můžeme dopočítat teplotu T_- .

Při znalosti teploty můžeme určit koncentraci elektronu následující rovnicí:

$$n_- = \frac{4I_{-p}}{eS} \sqrt{\frac{\pi m_-}{8kT_-}}, \quad (1.5)$$

kde „ S “ je plocha sondy. Pomocí sondové metody můžeme měřit voltampérovou charakteristiku, teplotu, napětí mezi dvěma místy plazmatu a koncentraci částic.

Vysokofrekvenční metody

Vysokofrekvenční metody, označované jako mikrovlnné, jsou jak aktivní tak pasivní. Princip metody je takový, že se měří pomocí mikrovlnných vln. Plazma je vystavena vysokofrekvenčnímu poli a pomocí změny frekvence vysokofrekvenčního pole můžeme určit frekvence, které plazmou projdou a frekvence, které plazma pohltí. Plazmatická frekvence pak představuje dolní mez frekvencí mikrovln. Je-li frekvence dopadající vlny větší, než plazmatická, pak vlna projde, ale pokud je frekvence menší, pak se od plazmatu odráží. Tato plazmatická frekvence je nepřímou úměrou spojena s koncentrací částic v plazmatu.

Je jasné, že pro měření této metody potřebujeme dlouho hořící plazmu a generátor vysokofrekvenčních vln s velkým rozsahem, aby bylo možné zjistit, co nejpřesněji plazmatickou frekvenci. Pokud jsme našli plazmatickou frekvenci, pak můžeme proměřovat ostatní vyšší frekvence. Zavedeme konstantu šíření, která je komplexní číslo:

$$\gamma = a + bj, \quad (1.6)$$

kde a je reálná složka a představuje změnu amplitudy, jedná se tedy o útlum, a b je komplexní složka představující změnu fáze. Při naměření změny útlumu a fáze po průchodu plazmou, můžeme určit různé parametry, jako například koncentraci částic v plazmatu.

Jednou z těchto metod je rezonanční metoda, kde se zkoumané plazma vloží do dutinového rezonátoru. Pomocí rezonátoru se změří, jak vypadá rezonanční průběh bez plazmatu, a poté jak vypadá rezonanční průběh s plazmatem. Rezonanční metoda je komplikovanější na určení a je u ní potřeba brát v úvahu i geometrii a uspořádání experimentu.

Dvě předcházející metody byly aktivní a nyní si popíšeme i metodu pasivní. Tato metoda spočívá v detekci a zkoumání záření vydávaného samotným plazmatem. V plazmatu detekujeme šumový proud. Jsme-li schopni změřit tento šumový proud, který vzniká náhodným pohybem elektronu a vlivem jejich urychlování, pak jsme schopni určit i teplotu plazmatu. Tato metoda se používá hlavně v případě, kdy nejsme schopni do plazmatu umístit sondu.

Všechny vysokofrekvenční metody vyžadují delší měření. Plazma musí být stabilní a naše měření může být nastavováno pro různé frekvence. Dále uvažujeme, že v plazmatu se během hoření nebudou měnit parametry, jako například teplota a počet nabitých částic. Pokud se bude jednat o rychlé výboje, pak je tato metoda nepoužitelná, pokud ale budeme chtít proměřit výbojová světla, pak je tato metoda optimální.

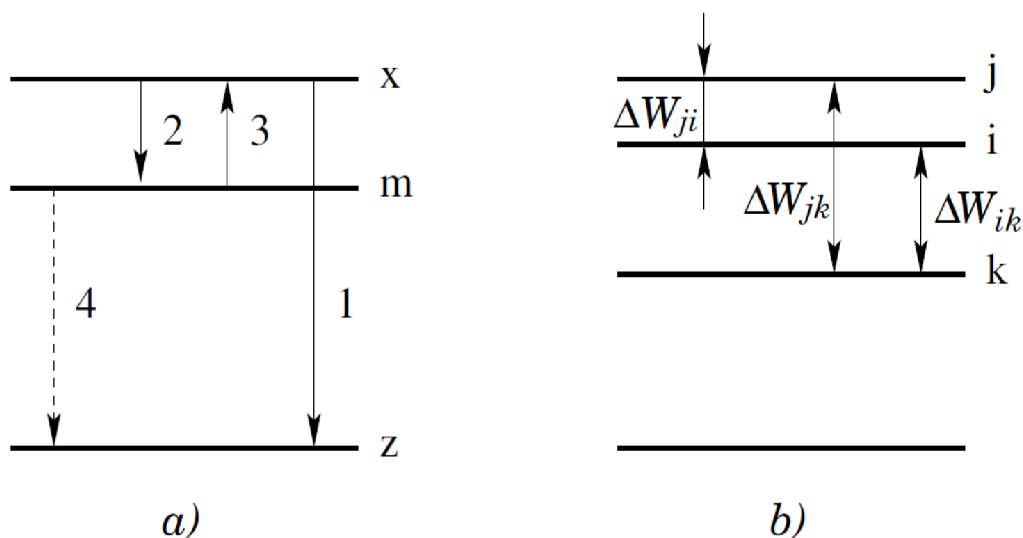
Optická metoda

Optické metody mohou být rozděleny do aktivních a pasivních, jako u vysokofrekvenčních metod. Pokud plazma ovlivňujeme z vnější strany, tedy plazma ozařujeme, pak se jedná o metody aktivní. Pokud zkoumáme pouze vyzařování samotným plazmatem, pak se jedná o metody pasivní.

Optické metody jsou založené na detekci a analýze záření vyzařovaného z plazmatu. Na základě těchto informací nám umožňují určit více parametrů plazmatu, jako například složení, tedy jaké prvky byly v plazmatu při měření, nebo teplotu. Jedna z dalších výhod pasivních metod je, že vlastním měřením neovlivňují plazma.

Pro naše měření bude důležitá pasivní optická metoda, při které budeme zkoumat spektroskopii plazmatu. Vyzařování plazmatu bude ve viditelné části spektra, případně v okolí

blízké ultrafialové a infračervené oblasti. U této metody se využívá přechodu mezi různými energetickými hladinami. V první kapitole jsme si vysvětlili, jak se určuje energie přechodu mezi energetickými hladinami a jak tento přechod chápat. Na obrázku 1.2 můžeme vidět ukázkou energetických hladin elektronu. Nyní si z těchto znalostí ukážeme, jak pomocí intenzity určit teplotu a ukážeme si, jak tuto intenzitu vypočítat.



Obr. 1.2: Energetické hladiny v atomu: a) přechody mezi hladinami: z - základní stav, x a m - excitované stavy, b) - energetický rozdíl mezi hladinami [6].

Určení teploty z intezity spektrálních čar

Na určení teploty potřebujeme znát intenzitu spektrálních čar. Můžeme si rozšířit vzorec 1.3 tak, že budeme uvažovat situaci, kdy na určité excitované hladině je více elektronu a započteme i pravděpodobnost přestupu mezi jednotlivými hladinami. Matematicky můžeme intenzitu přechodu mezi dvěma hladinami napsat jako:

$$I_{ik} \propto N_i A_{ik} h \frac{c}{\lambda_{ik}}, \quad (1.7)$$

kde N_i je počet elektronu v excitovaném stavu, A_{ik} je Einsteinův koeficient vyjadřující pravděpodobnost spontánní emise a λ_{ik} je vlnová délka fotonu vyzářeného při přestupu

z excitovaného stavu. Tato intenzita je uvedena tak, abychom věděli, které faktory ji v našem případě ovlivňují. Kdybychom chtěli vyjádřit intenzitu zaznamenanou pomocí detektoru, tak bychom museli zahrnout další parametry, jako například prostorový úhel, citlivost detektoru a další. Proto je pro nás výhodnější pracovat s relativními veličinami.

Pro určení teploty budeme potřebovat více spektrálních čar na různých vlnových délkách. Ze vztahu 1.7 nevíme, jak vypočítat počet elektronů v daném excitovaném stavu. K tomu využijeme rozdělovací funkci pro energii elektronu v plazmatu s termodynamickou rovnováhou, která je závislá na teplotě a je dána vztahem.

$$N_i = K g_i \exp\left(-\frac{E_{ik}}{kT}\right), \quad (1.8)$$

kde K je normovací konstanta a g_i je statistická váha stavu i . Tomuto rozdělení se říká Gibbsovo rozdělení. Normovací konstantu můžeme vynechat, protože by byla pro všechny stavy stejná a jen by nám posouvala výslednou přímku nahoru nebo dolů. Pokud rovnici 1.8 dosadíme do rovnici pro intenzitu a zlogaritmujeme, aby jsme se zbavili exponentu, pak platí vztah:

$$\ln\left(\frac{I_{ik}\lambda_{ik}}{A_{ik}g_i} \frac{1}{Khc}\right) \propto -\frac{1}{kT}E_{ik} \rightarrow 0 \propto \frac{1}{kT}E_{ik} + \ln\left(\frac{I_{ik}\lambda_{ik}}{A_{ik}g_i}\right) + \ln\left(\frac{1}{Khc}\right). \quad (1.9)$$

Nyní je krásně vidět, že všechny konstanty, které jsou stejné, jako například rychlost světla c , se po zlogaritmování projeví jako posun přímky nahoru nebo dolů. Jelikož nám jde o určení směrnice přímky, která je pak shodná s $1/kT$, tak nám na posunu přímky nezáleží. Směrnice přímky je tedy ve tvaru:

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{1}{kT}. \quad (1.10)$$

Posun přímky je způsoben tím, že platí:

$$\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b).$$

Tomuto matematickému vyjádření se říká logaritmus součinu. Je zřejmé, že pro známé energie naměříme určité intenzity, ty po zlogaritmování vyneseme do grafu a ze směrnice vzniklé přímky jsme schopni určit teplotu. Praktický příklad je uveden v kapitole zpracování naměřených dat.

Abychom mohli tuto metodu použít, tak musí platit následující předpoklady:

- plazma se nachází v termodynamické rovnováze
- srážky elektronů s molekulami a atomy hrají dominantní úlohu při přerozdělování energie mezi jednotlivými energetickými hladinami v atomu

Jako poslední nám zbývá určit intenzitu jednotlivých čar. Pro toto vyhodnocení se nejvíce hodí proložit naměřená data Gaussovou nebo Lorentzovou funkcí. Intenzitu pak získáme jako integrál těchto závislostí. Obvykle lze říct, ale ne vždy je to jednoznačné, která z následujících proložení bude dané spektrum lépe prokládat.

Gaussovou funkci můžeme zapsat:

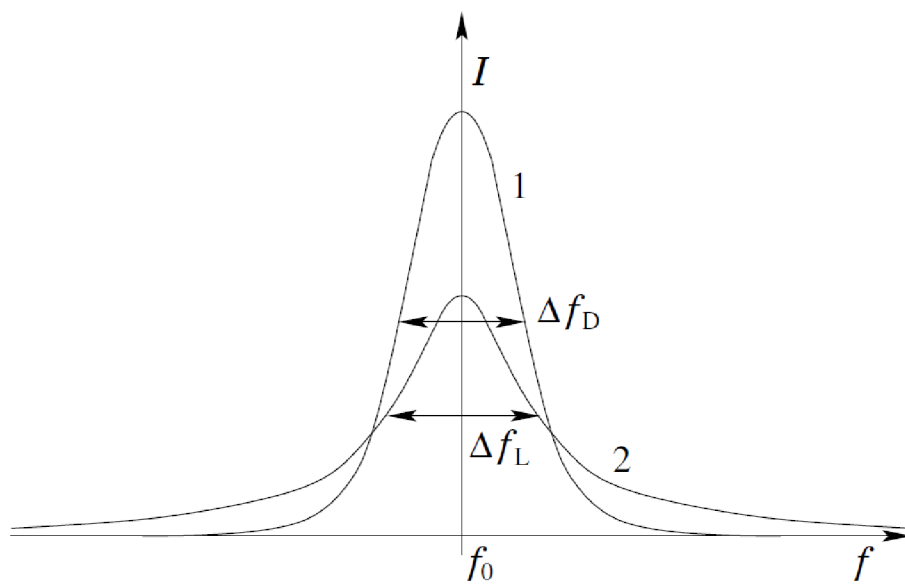
$$f(x) = Ae^{-\left(\frac{x-B}{C}\right)^2} + D, \quad (1.11)$$

kde A , B , C a D jsou koeficienty, které musíme měnit pro optimální proložení naměřených dat. Lorentzova funkce má předpis:

$$f(x) = A \left(\frac{1}{(x-B)^2 + C^2} \right) + D, \quad (1.12)$$

kde A , B , C a D jsou zase koeficienty funkce, které se musí nastavit pro optimální proložení naměřených dat. Na obrázku 1.3 můžeme vidět, jak vypadá průběh Gaussovy a Lorentzovy funkce, kde obsah pod křivkou je pro obě funkce stejný. Je vidět, že Gaussova funkce je větší, užší, rychleji roste a pak klesá. Naopak Lorentzova funkce je menší, roste a klesá pozvolněji a k nule se blíží pomaleji. Nyní si popíšeme, funkci jednotlivých koeficientů ve funkcích. Koeficient A nám zvyšuje, nebo snižuje výšku funkce. Koeficient B nám posouvá funkci doleva nebo doprava a podle tohoto koeficientu hledáme maximum naší prokládané funkce. Koeficient C ozančuje šířku funkce. Koeficient D je pak posunu celé funkce nahoru nebo dolů nezáleží tedy na parametru x a jedná se tedy o konstantu.

Nyní jsme si vysvětlili všechny potřebné informace k měření a zpracování dat. V následující kapitole se podíváme na další body bakalářské práce, a to na konstrukci výbojové komory, na druhy kalibrací a na měření a zpracování dat.



Obr. 1.3: Normované funkce používané pro prokládání spektrálních čar 1) - Gaussova funkce 2) - Lorentzova funkce. Obsah pod křivkou je pro obě funkce stejný [6].

2 Praktická část

V této části práce se zaměříme na samotné měření a zpracování výsledků. Ukážeme si, jak jsme zkonstruovali komoru určenou pro měření obloukového výboje. Dále si řekneme něco o kalibracích a jako poslední se podíváme na samotné měření a ukážeme si, jak se zpracovávala naměřená data.

2.1 Výbojová komora

V této části si vysvětlíme, jak probíhala stavba komory, požadavky na samotnou komoru a ukážeme si pár fotografií ze samotné výroby komory.

Výbojová komora je složená ze tří válcových částí. V horní části výbojové komory je uprostřed otvor, ve kterém je uložena horní elektroda. Dále jsou zde udělány tři otvory pro odfuk horkých plynů. Horní elektroda částečně zasahuje 1 až 2 mm do střední části. Prostřední část je složená z naší vyrobené výbojové komory, z držáku na upevnění optických vláken a mikroskopického sklíčka, které je vloženo mezi komoru a držák na upevnění optických vláken. Spodní část je složená obdobně jako horní část. Přes všechny tři části vedou tři dlouhé šrouby, které komoru spojují dohromady a zároveň slouží k upevnění celé komory na dřevěný podstavec. Jelikož neexistovala prostřední část komory, tak jsme museli tuto část vyrobit.

Jako první si řekneme požadavky na naši výbojovou komoru. Hlavní požadavek na komoru byl takový, že by měla být kompatibilní s již existujícími komorami a držáky elektrod. To znamená, že musí být možnost vyměnit pouze části, které jsou potřeba a ostatní, části byly pořád použitelné. Z toho důvodu jsme použili již předvyrobenou část, která byla válcovitého tvaru. Do této části jsme vyvrtali díry na uchycení ostatních částí. Celkem tedy tři díry na protažení šroubů a spojení vrchní a spodní části komory, které slouží jako držáky elektrod. Dále jsme vyvrtali prostřední část, ve které bude hořet obloukový výboj. Takto zpracovanou komoru můžeme vidět na obrázku 2.1.

Dalším krokem bylo zakrátit jednu stranu komory a udělat ji rovnou, aby se dalo použít ochranné sklíčko. Jelikož se jednalo o výrobek válcového typu, bylo na nás, jakou část komory zakrátíme. Jediným požadavkem na toto zarovnání strany bylo, aby vzdálenost od středu ve vertikálním směru byla všude stejná. Dále jsme potřebovali, abychom měli možnost vyvrtat díry na uchycení šroubku pro držák optických kabelů. Z tohoto důvodu jsme nemohli zkrácenou hranu udělat příliš daleko od středu výbojové komory.



Obr. 2.1: Výbojová komora - původní část komory po vytvoření děr na propojení všech částí.



Obr. 2.2: Výbojová komora - se zakrácenou stranou na upevnění krycího sklíčka.

Chtěli jsme mít možnost umístit optické vlákno do více bodů, abychom mohli měřit v budoucnu víc míst obloukového výboje současně. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli udělat mřížku 3x3, abychom měli možnost měřit obloukový výboj v devíti různých bodech. Tento požadavek je nutný z toho důvodu, že výboj trvá krátkou chvíli a velice těžko se opakuje. Není tedy možnost udělat dva stejné výboje, proto musíme měřit pokud možno všechna data zároveň.

Další věc, kterou jsme museli vyrobit, byl držák na umístění optických vláken. Optické vlákna se vkládají do držáku na začátek, a ne přímo do výbojové komory, aby byla krytá od samotného obloukového výboje a neponičila se tak. Jelikož je tento držák umístěn mezi horní a dolní částí výbojové komory, je potřeba aby se se svými rozměry vlezl mezi tyto části. Výška držáku musí být tedy stejná nebo menší, jak je výška prostřední části komory. Po vyrobení držáku s potřebnými rozměry jsme museli vyvrtat otvory na upevnění držáku s výbojovou komorou. Zde byla jen jedna podmínka, a to aby byly otvory co



Obr. 2.3: Výbojová komora - se zakrácenou stranou na upevnění krycího sklíčka pohled ze strany na výbojovou komoru.

nejdále od středu, abychom měli dost prostoru na mřížku 3x3. Další omezení bylo v tom, že jsme nemohli jít moc daleko, abychom neměli kolizi se šrouby, které spojují všechny části výbojové komory. Po vytvoření úchyty k výbojové komoře jsme vyvrtali mřížku 3x3. Při této konstrukci jsme se snažili, abychom měli všechny otvory dost blízko u sebe, aby všechny zasahovaly do střední části, tedy do části, kde bude obloukový výboj. Proto jsme nemohli mít díry v horizontálním směru daleko od sebe. Z toho důvodu, a taky abychom zachovali nějakou symetrii, jsme se snažili udělat v mřížce 3x3 všechny otvory stejně daleko od sebe.

Po vyrobení držáku jsme museli vyrobit otvory ve výbojové komoře. To jsme udělali tak, že jsme nejprve připravili otvory na uchycení držáku, vyřízli jsme závit a přichytili držák na optické kabely. Když jsme měli přidělaný držák, byli jsme schopni vyvrtat otvory na mřížku 3x3 ke středu výbojové komory. Posledním krokem při výrobě komory bylo vyleštit povrch výbojové komory na straně, kterou jsme zakracovali, a do které jsme vrtali. Toto jsme museli udělat z toho důvodu, že mezi držák, do kterého upevňujeme optické vlákna, a výbojovou komoru budeme vkládat mikroskopové sklíčko, které slouží jako ochrana před obloukovým výbojem. Další důvod je ten, že při vzniku obloukového výboje se bude plazma odfukovat ze středu výbojové komory. Kdyby byl povrch nevyleštěn, pak by na nerovnostech mohlo docházet k tomuto odfuku plazmatu, což by mohlo ničit optická vlákna. Další výhodou je, že při umístění měděného drátku můžeme vidět, kde se drátek nachází a dobře ho umístit. Po přepálení drátku proudem vzniká obloukový výboj. Finální středový kus můžeme vidět na obrázku 2.5.



Obr. 2.4: Držák na upevnění optických vláken.



Obr. 2.5: Finální stav střední části výbojové komory

2.2 Kalibrace

V této části vysvětlíme, jaké druhy kalibrace jsme dělali a zároveň si vysvětlíme, proč se tyto druhy kalibrace dělají.

Jako první si musíme objasnit, jak funguje spektroskop. Do spektroskopu přichází optickým kabelem optický záznam výboje vstupní štěrbinou. Ten je pomocí zrcadel přeměřován na difrakční mřížku. Tato mřížka má na sobě vryp, a když na ně dopadne světelný paprsek, rozloží se do různých vlnových délek. Podle hustoty vrypů na mřížce dostáváme šířku spektra, kterou můžeme vidět. To je způsobeno tím, že další část dopadá mimo senzory spektroskopu. Pokud tedy chceme větší rozlišení, tak budeme vidět menší část spektra a obráceně. Z tohoto důvodu si musíme dopředu určit, v jaké části spektra budeme náš výboj pozorovat. Podle toho, ve které oblasti pozorovaný prvek nejvíce září, což učiníme preferovaných počtu spektrálních čar. Dále můžeme otáčet mřížkou, čímž nastavíme minimum a maximum spektra, které pozorujeme. V našem případě jsme nastavili spektroskop do polohy od 340 nm do 700 nm.

Poté, co se rozloží paprsek do různých vlnových délek, dopadá paprsek na senzor, který měří intenzitu dopadající na jeden pixel tohoto senzoru. Nastává první kalibrace, tedy kalibrace x-ové osy. Spektroskopu musíme říct, jaký pixel čipu odpovídá vlnové délce. K tomu slouží první kalibrační lampa. Výrobce nám zaručuje, že při měření budeme vidět určité spektrální čáry. Uděláme měření této kalibrační lampy a při zpracování nastavíme pro jednotlivé pixely odpovídající vlnové délky. V našem případě jsme měřili od 340 nm do 700 nm a výrobce udával jedenáct spektrálních čar. Tyto čáry jsme poté přidali různým pixelům. Při této kalibraci musíme myslet na to, že paprsek, o vlnové délce udávaný výrobcem, může dopadat mezi dva pixely, a proto se musíme rozhodnout, který pixel bude pro tuto vlnovou délku. Jelikož v našem měření neurčujeme vlnovou délku spektrálních čar, ale bereme přesné hodnoty z [1], tak to naše měření neovlivní. Kdybychom měřili neznámý prvek a určovali tento prvek pomocí naměřených spektrálních čar, pak by chyba vnesená touto kalibrací byla 0,088 nm.

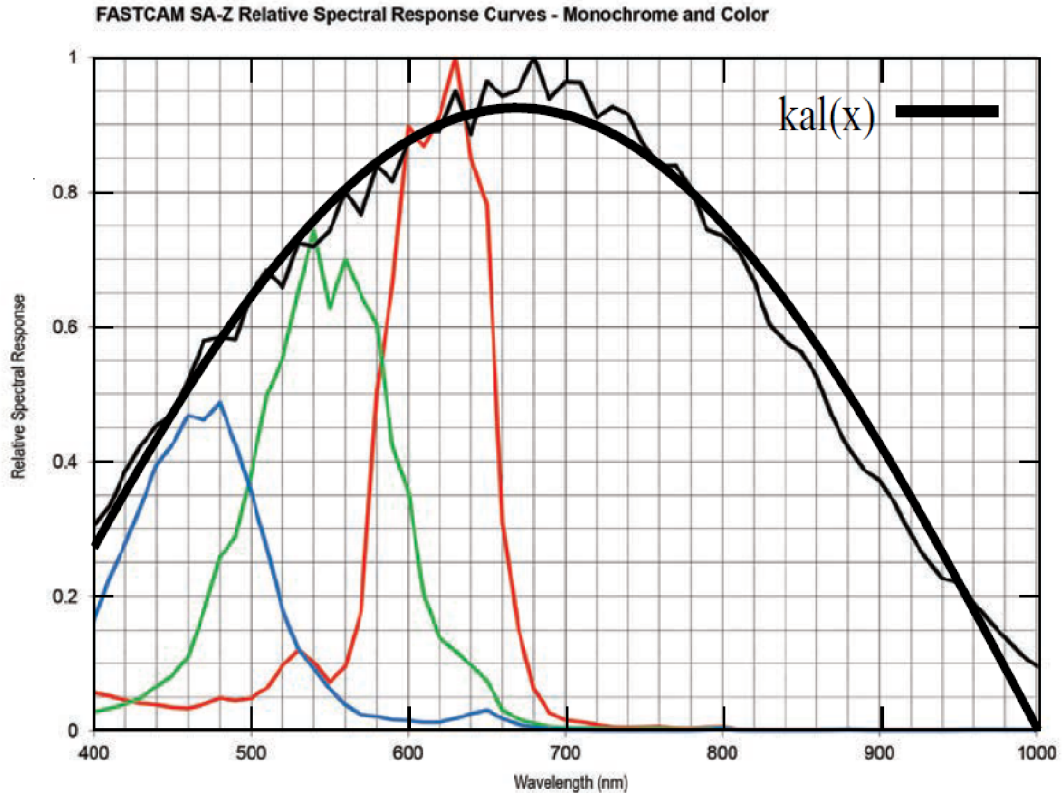
Teď tedy víme, kam dopadá intenzita, a jaká je vlnová délka našeho naměřeného signálu. Další kalibrace je y-ová kalibrace. Je způsobena tím, že každý detektor měří intenzitu na různých vlnových délkách s jinou citlivostí. Proto použijeme data od výrobce, který udává, jaká je citlivost pro dané vlnové délky 2.6. Tato kalibrace může snížit nebo zvýšit některá naměřená data podle proložení funkce. Tuto kalibraci jsme dělali v naší zájmové oblasti. Pro proložení lze použít různé funkce například polynomi n-tého řádu, nicméně hodnotám

od výrobce nejlépe odpovídala funkce $\sin(x)$:

$$\text{kal}(x) = a \cdot \sin(0.001 \cdot b \cdot x + c), \quad (2.1)$$

kteřé byli zjištěny proložením $a = 0,926291$, $b = 4,74467$ a $c = -1,59974$. Tyto hodnoty jsme získali při numerickém proložení pomocí programu gnuplot. Proměnná x je odpovídající vlnová délka. Pokud tedy chceme vědět, jaká je naměřená hodnota pro danou vlnovou délku, tak vezmeme intenzitu, kterou jsme naměřili a vydělíme ji $\text{kal}(x)$. Poté máme reálnou intenzitu v dané vlnové délce.

Dalším způsobem, jak kalibrovat y-ovou osu, je použít kalibrační lampu. Zde nám výrobce přesně říká, jakou intenzitu naměříme na dané vlnové délce. Proto naměřená data porovnáme s daty od výrobce a stanovíme korekční koeficient dělením naměřených a výrobcem udávaných dat. Díky tomu dostaneme koeficient, kterým musíme vynásobit naše měřená data tak, aby odpovídala skutečnosti. Tato kalibrace může snížit nebo zvýšit některá naměřená data podle velikosti koeficientů. Toto při našem měření nebylo možné udělat, protože kalibrační lampa má malou intenzitu a musela by být nastavena dlouhá expoziční doba. Bohužel vysokorychlostní kamera má při záznamu velký šum a to by způsobilo, že by nešla poznat intenzita lampy od šumu, respektive by se kapacita pixelu naplnila šumem, a nebylo by tedy možné rozeznat intenzitu lampy a provést výpočet koeficientu popisovaný výše.



Obr. 2.6: Data od výrobce pro kalibraci y-ové osy a proložení kalibrační funkci.

2.3 Měření a zpracování dat obloukového výboje

V této části popíšeme postup měření a způsob zpracování naměřených dat. Také si ukážeme, jak se z pyrometrické přímky určí teplota.

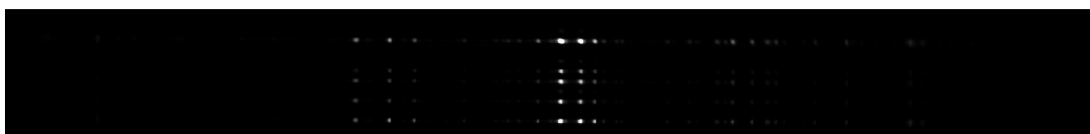
Nejprve si popíšeme postup samotného měření. Mezi katodu a anodu vložíme měděný drátek o průměru 0,1 mm, který se průchodem proudem přepálí. Připevníme výbojovou komoru na výstup bateriové zkratovny. Do držáku připevníme optické kabely. Následně zapneme spektroskop a propojíme jej s vysokorychlostní kamerou. Nastavíme spektroskop pomocí programu v počítači na požadovanou vlnovou délku, a ten následně natočí difrakční mřížku uvnitř spektroskopu. Nabijeme kondenzátory na požadované napětí, tedy přibližně 100 V. Nyní je vše nastaveno a můžeme pomocí tlačítka „zkrat“ spustit měření.

Vysokorychlostní kamera zaznamená data, které byly přivedeny optickými kabely do spektroskopu. Pro správné zpracování musíme změřit i pozadí. To probíhá tak, že pustíme měření bez výboje a naměřená data musíme odečíst od dat potřebných k vyhotovení. Mu-

síme dodržet dobu expozice, abychom měli možnost data odečíst. Toto měření je potřebné k tomu, abychom od dat s výbojem byli schopní dobře odečíst pozadí, a tak do našeho měření nevnášeli chybu jiných světelných zdrojů, jako jsou například halogenové výbojky.

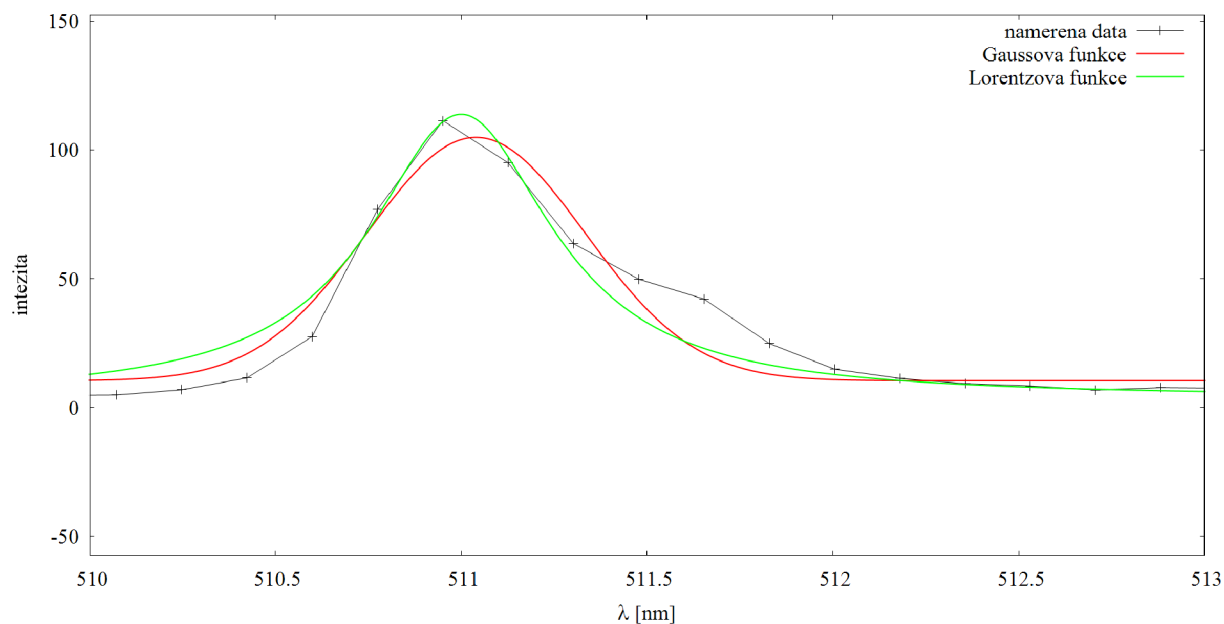
Po naměření dat musíme provést kalibraci na x-ovou osu popsanou výše. I zde je potřeba měření provést dvakrát. Jednou se zapnutou kalibrační lampou a podruhé s vypnutou kalibrační lampou pro odečtení pozadí. Neměřená data z kalibrační lampy porovnáme s daty uvedenými od výrobce. Poté se zaměříme na data měřená v prostřední části spektra, protože v tomto místě má spektroskop nejlépe zaostřený signál na detektor.

Jelikož vysokorychlostní kamera zaznamenává data a jejím výstupem je video respektive obrázky ve formátu .tif, tak jsme museli tyto obrázky zpracovat a převést do textového formátu. K tomu nám posloužil program „tiff2m.exe“, který napsal vedoucí Mgr. Petr Kloc Ph.D. Jelikož na obrázku můžeme vidět více vláken museli jsme tento obrázek rozdělit na jednotlivé vlákna. Toto nám umožňuje program „tiff2m.exe“. V programu se dají nastavit hranice, kde se sečtou pixely které jsou pod sebou. Dále se v programu může udělat kalibrace x-ové osy. Do samostatného textového souboru musíme napsat pixel, a k tomu odpovídající vlnovou délku. Následně program převede data z .tif do textového dokumentu, kde jsou dva sloupce, první odpovídá vlnové délce a druhý odpovídá intenzitě.



Obr. 2.7: Ukázka naměřených dat z vysokorychlostní kamery před zpracováním.

Nyní musíme se rozhodnout, která z funkcí popisovaných v kapitole 1.3.1 se více shoduje s naměřenými daty. To uděláme pro více vlnových délek, a na základě větší shody jednu z nich vybereme. Na obrázku 2.8 můžeme vidět ukázkou prokládaní naměřených dat Gaussovou a Lorentzovou funkcí. V našem měření jsme se pro výpočet intenzity rozhodli použít Gaussovou funkci, kterou jsme následně používali na všechna zpracovávaná data. Pomocí programu gnuplot získáme potřebné koeficienty A, B, C a D tak, že provedeme fitování Gaussovou funkcí na naměřená data a na měřených vlnových délkách.



Obr. 2.8: Ukázka prokládání naměřených dat Gaussovou a Lorentzovou funkcí.

Tab. 2.1: Energie a konstanty pro atomární čáry získané z [1].

λ [nm]	E_k [eV]	g_k	A_{ik}
427,511	7,737027	8	$3,45 \cdot 10^7$
458,697	7,804589	6	$3,20 \cdot 10^7$
465,112	7,737027	8	$3,80 \cdot 10^7$
470,459	7,737027	8	$5,50 \cdot 10^6$
510,554	3,816692	4	$2,00 \cdot 10^6$
515,324	6,191175	4	$6,00 \cdot 10^7$
529,252	7,737027	8	$1,09 \cdot 10^7$
570,024	3,816692	4	$2,40 \cdot 10^5$
578,213	3,785898	2	$1,65 \cdot 10^6$

Zpracovaná data vykreslíme a pomocí proložení lineární funkcí v tomto programu zjistíme směrnici přímky včetně toho, s jakou chybou odpovídá přímka proložením naměřenými hodnotami. Jsme tedy schopni zjistit chybu měření. Následně tuto chybu vynásobíme Studentovým koeficientem podle toho, z kolika spektrálních čar jsme měli data k sestavení této

přímky. Pak jsme se tedy měli 68,3% kvantil, což odpovídá 1σ . Tuto hladinu významnosti jsme dodržovali pro všechny další měření. Například pokud jsme zjistili rovnici přímky ve tvaru $f(E_k) = -0,741E_k + 1,14$, a pokud by relativní chyba tohoto měření byla 12%, tak by zpracování bylo následující. Pomocí směrnice této přímky, která se nazývá pyrometrická přímka, můžeme zjistit teplotu. Víme z teoretické části, že platí následující vztah:

$$\operatorname{tg}\alpha = -\frac{1}{kT}$$

kde $\operatorname{tg}\alpha$ je směrnice přímky, k je Boltzmannova konstanta v eV a T je teplota. Po dosazení platí:

$$T = -\frac{1}{k \cdot \operatorname{tg}\alpha} = -\frac{1}{-0,741 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5}} = 15668 \text{ K}$$

Pokud započítáme i chybu vzniklou prokládáním přímky, pak můžeme zapsat teplotu

$$T = (15\,668 \pm 2526) \text{ K}$$

Tímto způsobem jsme zpracovali všechny data. V následujících kapitolách budou ukázány výsledky tří měření, které jsme zpracovali, podle postupu ukázaném v této kapitole.

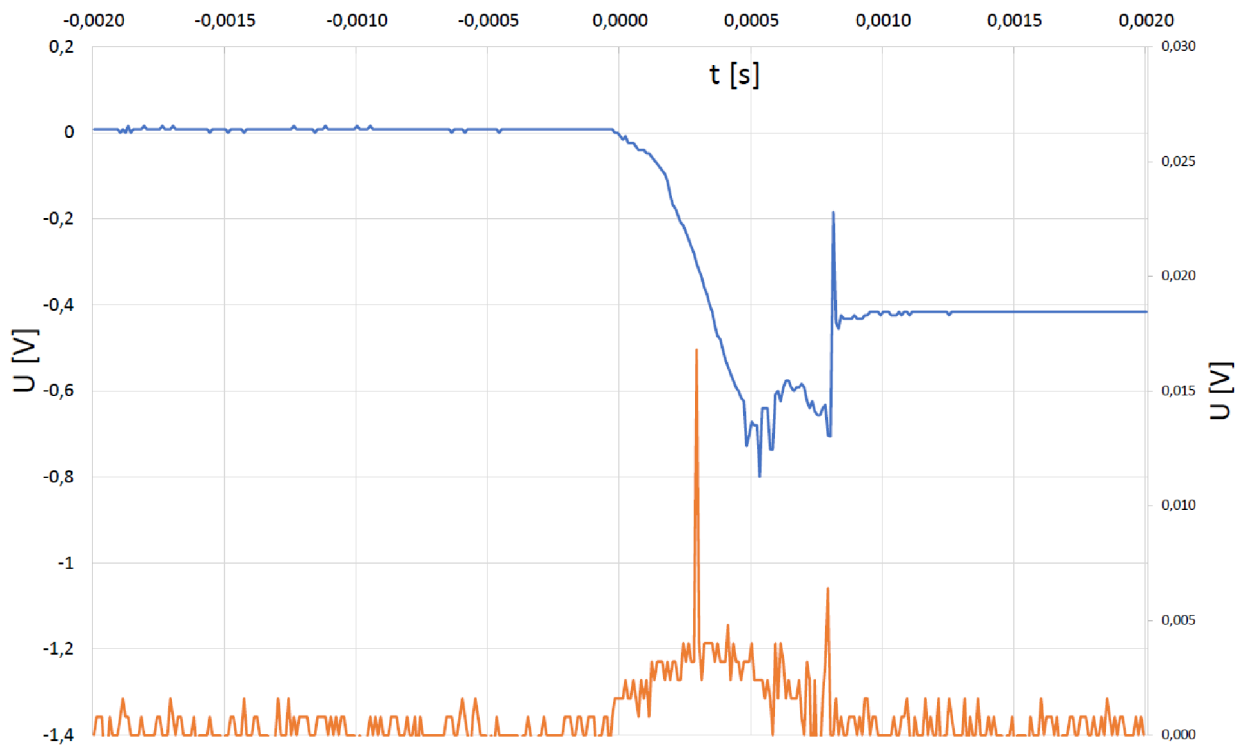
2.3.1 První měření

Při prvním měření jsme nastavovali spektroskop a vysokorychlostní kameru, a proto se nám nepodařilo zaznamenat všechna vlákna, ale pouze jedno vlákno. První měření proběhlo za těchto podmínek. Hodnoty změřené osciloskopem byly:

- $U_{P-P}=160\text{ V}$
- $U=80\text{ V}$
- $I_{P-P}=160\text{ A}$

K měření proudu a napětí sloužily výstupy na zkratovací baterii s výstupy, kde platí $30\mu\text{V}=1\text{ A}$ a $30\text{ mV}=1\text{ A}$. Data z osciloskopu jsme zpracovali do grafu 2.9.

Změřené hodnoty jsme zpracovali podle postupu popisovaném v této kapitole. Chyby jsme vynásobili Studentovým koeficientem a vytvořili jsme pyrometrické přímky, kde jsme z jejich sklonu určili teploty. Zpracované hodnoty jsme zapsali do tabulky 2.2. Tyto hodnoty jsme následně zpracovali do grafu 2.10.

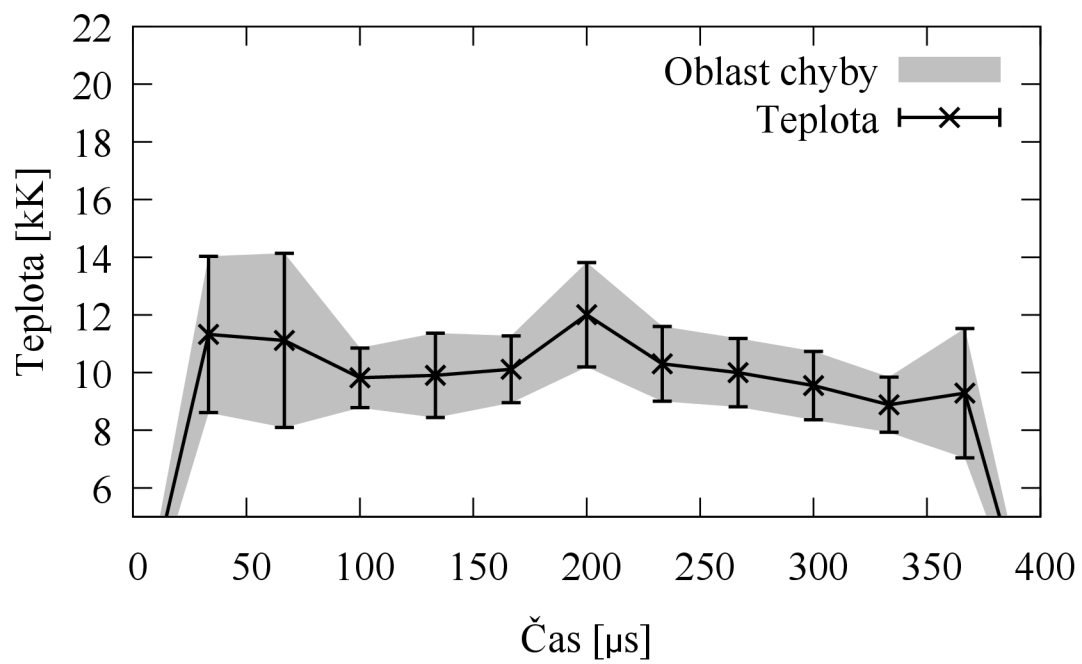


Obr. 2.9: Záznam napětí (modrá) a proudu (oranžová) v čase pro první měření.

Tab. 2.2: Tabulka hodnot teplot a jejich chyb v průběhu času pro první měření.

$t[\mu\text{s}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$
0	—	—
33	11322	2709
66	11117	3020
100	9820	1036
133	9905	1466
166	10114	1161
200	12006	1808
233	10304	1300
266	10001	1188
300	9550	1189
333	8885	958
366	9288	2245
400	—	—

Z tabulky a z grafu můžeme vidět, že největší teplota byla vypočítaná 12006 K. Dále můžeme vidět, že největší chyba měření byla přes 3000 K, což odpovídá relativní chybě 27%. Dále můžeme vidět stabilní vývoj teploty.



Obr. 2.10: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro první měření.

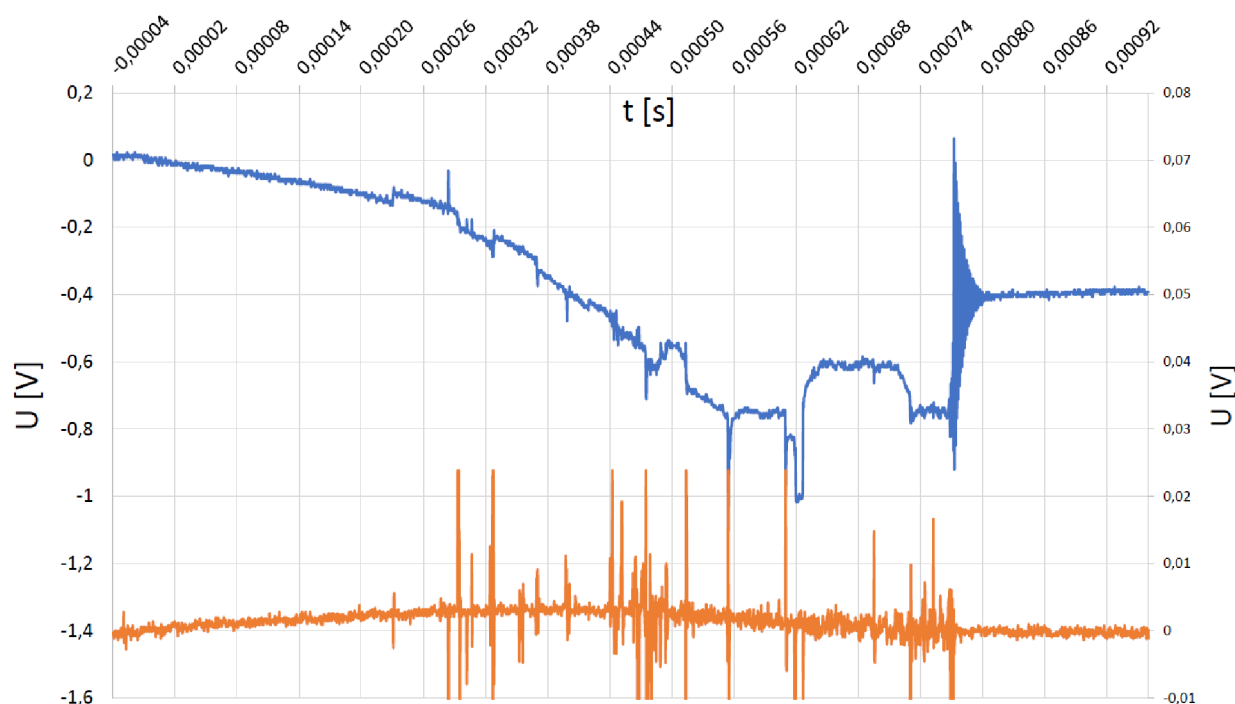
2.3.2 Druhé měření

Druhé měření proběhlo za těchto podmínek. Hodnoty změřené osciloskopem byly:

- $U_{P-P} = 200 \text{ V}$
- $U = 80 \text{ V}$
- $I_{P-P} = 100 \text{ A}$

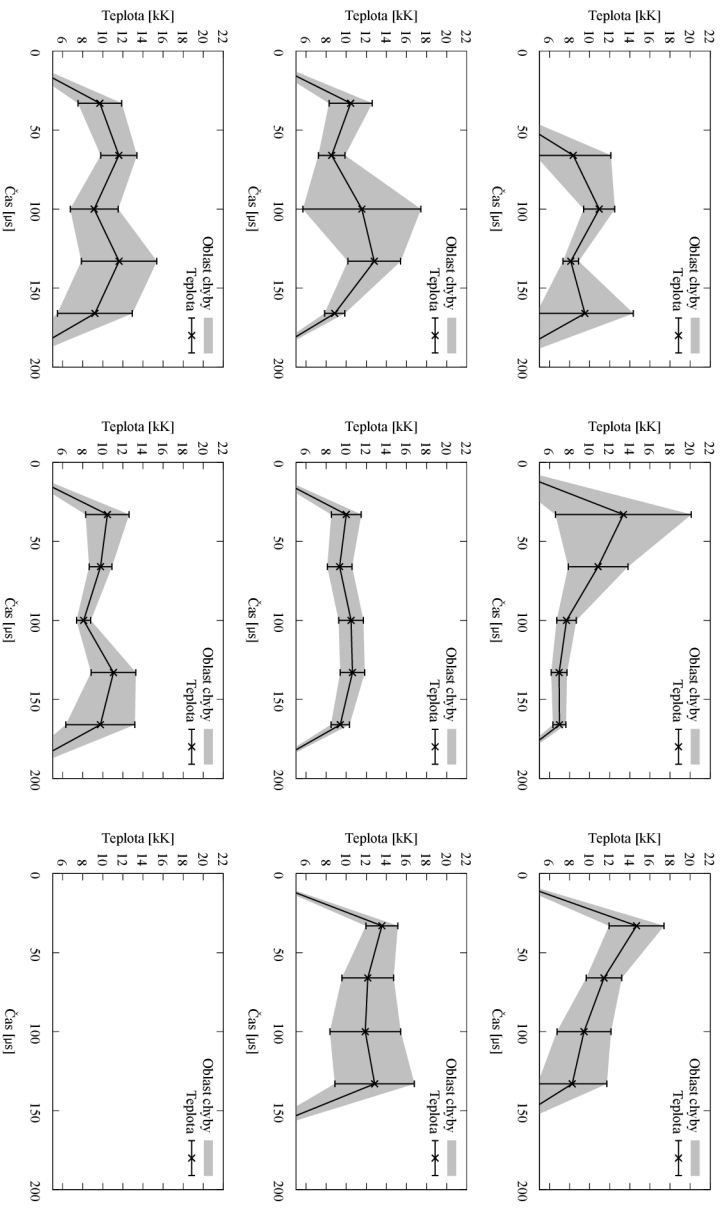
K měření proudu a napětí sloužily výstupy na zkratovací baterii s výstupy. Data z osciloskopu jsme zpracovali do grafu 2.11.

Změřené hodnoty jsme zpracovali podle postupu popisovaném v této kapitole. Chyby jsme vynásobili Studentovým koeficientem a vytvořili jsme pyrometrické přímky, kde jsme z jejich sklonu určili teploty. Zpracované hodnoty jsme zapsali do tabulky 2.3. Tyto hodnoty jsme následně zpracovali do grafu 2.12.



Obr. 2.11: Záznam napětí (modrá) a proudu (oranžová) v čase pro druhé měření.

Z tabulky a z grafů můžeme vidět, že největší teplota byla vypočítaná 14673 K. Dále můžeme vidět, že největší chyba měření byla přes 6759 K, což odpovídá relativní chybě 51%. Z grafu můžeme vidět, že teplota byla nejstabilnější v prostřední části. Dále si můžeme všimnout, že v pravém dolním rohu nebyla naměřená žádná teplota, respektive nebyla naměřena žádná intenzita záření, a tedy se nedala určit teplota v tomto bodě.



Obř. 2.12: Grafické znázornění časového průběhu teploty oblouku ve všech měřených bo-
dech pro druhé měření. Nastavení y-ové osy bylo od 5000 do 22000 K. Toto nastavení bylo
záměrné, aby se v grafech dalo rychle orientovat.

Tab. 2.3: Tabulka hodnot teplot a jejich chyb v průběhu času pro druhé měření. Rozložení tabulky odpovídá grafickému znázornění v grafu 2.14.

$t[\mu\text{s}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$
0	—	—	—	—	—	—
33	—	—	13360	6759	14673	2731
66	8366	3752	10844	2967	11432	1765
100	10952	1548	7695	973	9438	2685
133	8124	773	6963	785	8269	3438
166	9528	4821	6995	645	—	—
200	—	—	—	—	—	—
0	—	—	—	—	—	—
33	10437	2142	10005	1486	13550	1584
66	8551	1319	9347	1228	12145	2571
100	11558	5868	10481	1229	11894	3523
133	12790	2618	10622	1218	12827	3957
166	8850	1006	9408	916	—	—
200	—	—	—	—	—	—
0	—	—	—	—	—	—
33	9707	2173	10451	2156	—	—
66	11594	1796	9769	1131	—	—
100	9141	2384	8088	705	—	—
133	11620	3753	11059	2222	—	—
166	9212	3721	9759	3431	—	—
200	—	—	—	—	—	—

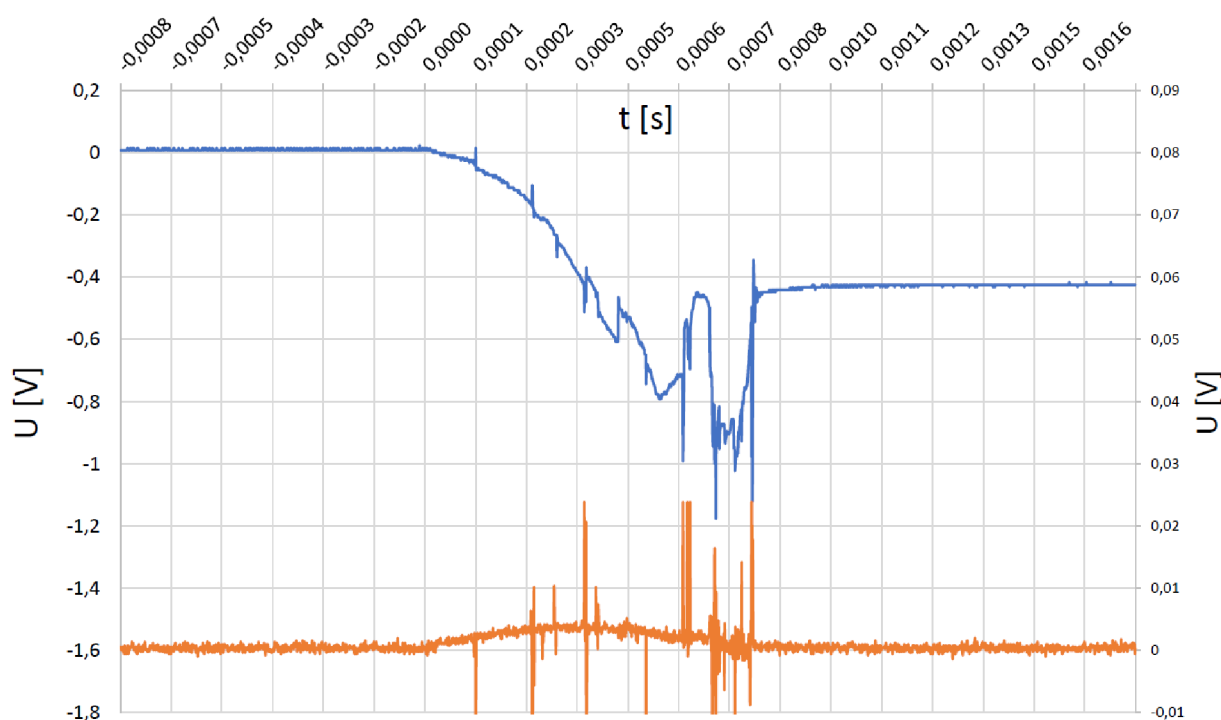
2.3.3 Třetí měření

Třetí měření proběhlo za těchto podmínek. Hodnoty změřené osciloskopem byly:

- $U_{P-P} = 190 \text{ V}$
- $U = 80 \text{ V}$
- $I_{P-P} = 135 \text{ A}$

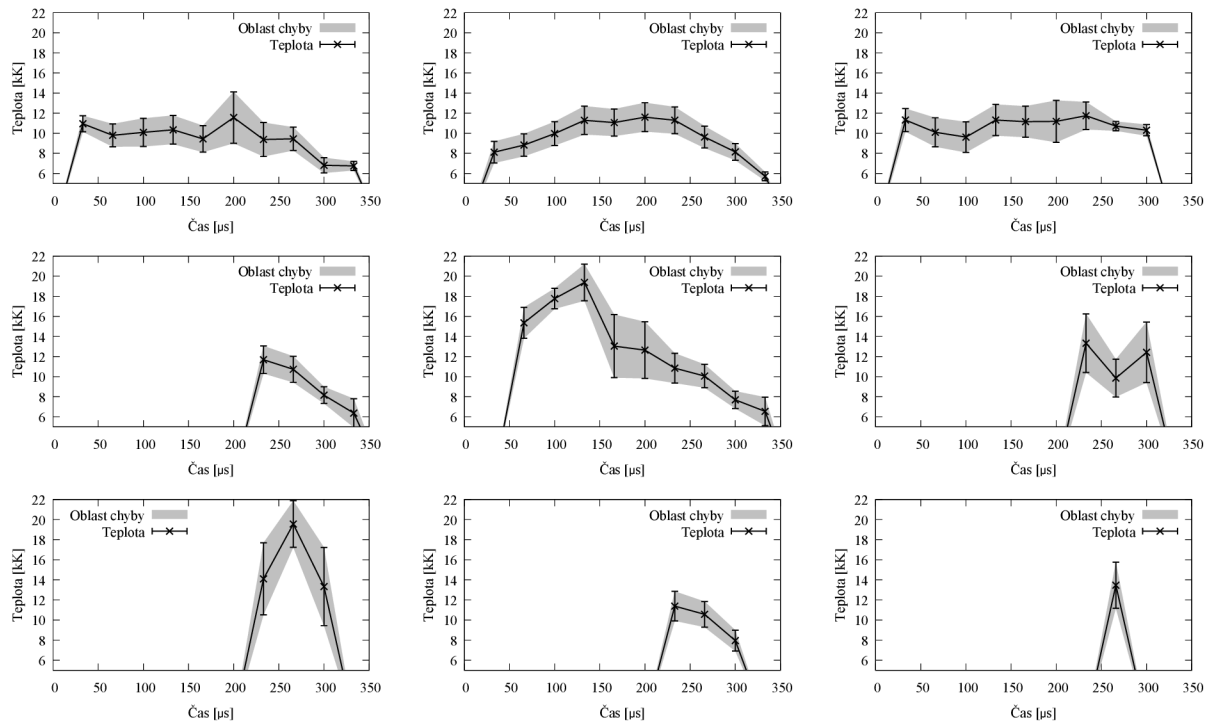
K měření proudu a napětí sloužily výstupy na zkratovací baterii s výstupy. Data z osciloskopu jsme zpracovali do grafu 2.13.

Změřené hodnoty jsme zpracovali podle postupu popisovaném v této kapitole. Chyby jsme vynásobili Studentovým koeficientem a vytvořili jsme pyrometrické přímky, kde jsme z jejich sklonu určili teploty. Zpracované hodnoty jsme zapsali do tabulky 2.4. Tyto hodnoty jsme následně zpracovali do grafu 2.14.



Obr. 2.13: Záznam napětí (modrá) a proudu (oranžová) v čase pro třetí měření.

Z tabulky a z grafů můžeme vidět, že největší teplota byla vypočítaná 19380 K. Dále můžeme vidět, že největší chyba měření byla přes 3893 K, což odpovídá relativní chybě 29%. Z grafu můžeme vidět, že teplota byla nejstabilnější v prostřední části. Dále si můžeme všimnout, že v pravém dolním rohu byla naměřená teplota jen v jednom časovém okamžiku. Můžeme si všimnout, že největší teplota byla ve středu a také, že se oblouk



Obr. 2.14: Grafické znázornění časového průběhu teploty oblouku ve všech měřených bodech pro třetí měření. Nastavení y-ové osy bylo od 5000 do 22000 K. Toto nastavení bylo záměrné, aby se v grafech dalo rychle orientovat.

rozpínal v průběhu času do stran, jak se střed ochlazoval. Dále si můžeme všimnout, že víc dat jsme naměřili v horní části, což můžeme přisuzovat tomu, že teplejší vzduch je odváděn do horní části. Vzniká tak proudění vzduchu od spodní do horní části a i v grafu je vidět, že ve spodní části bylo naměřeno mnohem málo dat.

Tab. 2.4: Tabulka hodnot teplot a jejich chyb v průběhu času pro třetí měření. Rozložení tabulky odpovídá grafickému znázornění v grafu 2.17.

$t[\mu\text{s}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$	$T[\text{K}]$	$\delta_T[\text{K}]$
33	10944	795	8113	1074	11312	1146
66	9794	1136	8824	1116	10101	1443
100	10086	1400	9967	1186	9615	1523
133	10344	1424	11286	1415	11313	1554
166	9439	1320	11066	1343	11151	1543
200	11561	2558	11603	1439	11183	2082
233	9376	1690	11289	1335	11746	1372
266	9444	1158	9621	1088	10710	468
300	6805	766	8142	831	10306	556
333	6748	451	5709	432	—	—
33	—	—	—	—	—	—
66	—	—	15361	1536	—	—
100	—	—	17773	1020	—	—
133	—	—	19380	1822	—	—
166	—	—	13039	3140	—	—
200	—	—	12641	2816	—	—
233	11683	1373	10848	1484	13333	2920
266	10731	1296	10060	1162	9857	1875
300	8159	829	7691	860	12422	3011
333	6372	1429	6542	1415	—	—
33	—	—	—	—	—	—
66	—	—	—	—	—	—
100	—	—	—	—	—	—
133	—	—	—	—	—	—
166	—	—	—	—	—	—
200	—	—	—	—	—	—
233	14102	3581	11388	1469	—	—
266	19560	2315	10572	1273	13473	2295
300	13336	3893	7956	1041	—	—
333	—	—	—	—	—	—

Závěr

Naším úkolem bylo seznámit se s problematikou měření teploty obloukového výboje optickou metodou. Všechny teoretické informace byly shrnuty v teoretické části, kde jsme zavedli i potřebné vzorce pro následné měření a zpracování naměřených dat. Následně jsme vyrobili výbojovou komoru podle požadavků, které jsme si určili. Výroba výbojové komory byla popsána v kapitole 2.1. Následně jsme se museli seznámit se spektroskopem a způsobem měření, abychom mohli správně provést kalibraci x-ové a y-ové osy. Všechny tyto informace jsme popsali v kapitole 2.2. Posledním bodem bylo změřit a zpracovat časový vývoj teploty pro různé napětí a proudy ve více bodech. Postup měření a zpracování teploty jsme udělali v kapitole 2.3.

První měření

Napětí změřené osciloskopem bylo $U_{P-P}=160\text{ V}$ a zotavené napětí $U=80\text{ V}$. Proud změřený pomocí osciloskopu byl $I_{P-P}=160\text{ A}$. Z tabulky a z grafu vidíme, že teploty výbojového oblouku se pohybují v rozmezí od 8 500 do 12 000 K. Dále je vidět, že odchylka, která byla určena z lineární regrese, je 10-15%. Největší absolutní chyba byla 3 000 K. Tato chyba byla způsobena tím, že jsme měli pouze tři spektrálních čar, ze kterých jsme získávali data pro určení pyrometrické přímky. To způsobilo, že Studentův koeficient byl 1,839, což chybu měření zvedne téměř o dvojnásobek. Relativní chyba, po započítání Studentova koeficientu, byla v rozmezí 10-27%.

Při prvním měření probíhalo nastavování spektroskopu, vysokorychlostní kamery a umístění vláken. Toto nastavování způsobilo, že jsme nebyli schopni naměřit více než jedno vlákno. Nicméně můžeme vidět, že naměřené data se pohybují v malém rozsahu teplot a to 3 500 K. Nebylo zde tudíž velké rozdíly teplot, jako v dalších měřeních.

Druhé měření

Napětí změřené osciloskopem bylo $U_{P-P} = 200\text{ V}$ a zotavené napětí $U = 80\text{ V}$. Proud změřený pomocí osciloskopu byl $I_{P-P} = 100\text{ A}$. Z tabulky a z grafu vidíme, že teploty výbojového oblouku se pohybují v rozmezí od 6 900 do 15 000 K. Dále je vidět, že odchylka, která byla určena z lineární regrese, je 9,5-28%. Největší absolutní chyba byla 6 800 K. Relativní chyba, po započítání Studentova koeficientu, byla v rozmezí 9,5-51%. Rozsah teplot vypočítaných byl 8 100 K.

Při druhém měření byly všechny části správně nastaveny, a proto můžeme vidět naměřené teploty ve všech bodech. Nicméně si můžeme všimnout, že pravý spodní roh je bez vypočítaných hodnot teplot. To bylo způsobeno tím, že naměřené intenzity čar se nedaly rozlišit od šumu pozadí, nebo byly naměřeny jen dvě intenzity. Pro dvě intenzity nejsme schopni proložit lineární regresi, protože při proložení dvou bodů nevznikne odchylka prolo-

žením, a tedy naměřená data by byly bez chyby. Proto jsme tyto data nepoužili a nemáme tedy v tomto bodě vypočítány hodnoty teploty. Dále si můžeme všimnout, že teplota a chyby teploty byly nejstabilnější v prostřední části.

Třetí měření

Napětí změřené osciloskopem bylo $U_{P-P} = 190 \text{ V}$ a zotavené napětí $U = 80 \text{ V}$. Proud změřený pomocí osciloskopu byl $I_{P-P} = 135 \text{ A}$. Z tabulky a z grafu vidíme, že teploty výbojového oblouku se pohybují v rozmezí od $5\,700 \text{ K}$ do $20\,000 \text{ K}$. Dále je vidět, že odchylka, která byla určena z lineární regrese je 10-16%. Největší chyba byla $3\,900 \text{ K}$. Největší absolutní chyba byla $6\,800 \text{ K}$. Relativní chyba, po započítání Studentova koeficientu, byla v rozmezí 10-29%. Rosah teplot vypočítaných byl $14\,300 \text{ K}$.

Třetí a poslední měření bylo naměřeno nejlépe, čemuž odpovídá naměření ve všech devíti bodech a nejdelším časovým záznamem ve všech bodech. U tohoto měření si můžeme všimnout, že jsme naměřili největší teplotu. Dále si můžeme všimnout, že šířka oblouku byla malá a vysoká teplota a při ochlazování se začal oblouk rozpínat a teplota se zmenšovalo. Všimněme si tohoto jevu v prostředním řádku vypočítaných hodnot. Můžeme vidět, že do času $200 \mu\text{s}$ v levé a pravé části nejsou naměřené intenzity a tedy jsme nebyli schopni určit teplotu. Dále vidíme, že v prostřední části do doby $200 \mu\text{s}$ byla naměřena největší teplota, a to $19\,400 \text{ K}$. Dále si můžeme všimnout, že teplejší vzduch byl odváděn do vyšších částí výbojové komory. Z grafů můžeme vidět, že v horním řádku byli stabilní a s relativní malou chybou.

Chyby měření

Při této metodě jsme uvažovali, že všechny naměřené intenzity a koeficienty, které jsme požívali, byly bez chyby. To ovšem není pravda, protože určování intenzity bylo pomocí prokládaní Gaussovy funkce, a ta neodpovídá vždy reálnému profilu. Kdybychom chtěli lepší určení intenzity, museli bychom prokládat naměřená data složitější funkcí (Voigtův profil). Ten by ovšem nebyl tak lehce integrovatelný a bylo by složitější naměřená data zpracovat. Dále musíme vzít v potaz, že konstanty, které jsme brali z [1], nemusí být úplně přesné. Vnášejí nám tedy do výpočtu další možnou chybu. Abychom tyto chyby odstranili, museli bychom dohledat původ těchto konstant a jejich chybu, kterou bychom museli následně vzít v potaz. Dále bychom museli dopočítat výslednou chybu pomocí parcelních derivací a zohlednit chybu konstant.

Z naměřených dat je vidět, že velikost chyby závisela na lineární regresi, tedy jak byly body blízko prokládané přímky. Taky zaleželo z kolika spektrálních čar jsme měli data (intenzitu) k určování pyrometrické přímky. Pokud jsme využili všech 9 spektrálních čar, tak byl Studentův koeficient 1,077. Pokud jsme použili minimum možných čar, což byly 3, tak byl Studentův koeficient 1,839. Pokud jsme použili všechny spektrální čáry,

tak se chyba téměř nezměnila od odchylky lineární regrese. Pokud se k výpočtu použili pouze 3 spektrální čáry, tak se chyba téměř zdvojnásobila. Dvě spektrální čáry jsme použít nemohli, protože proložením dvou bodu nevznikne žádná odchylka lineární regresí.

Naše čtyři body ze zadání bakalářské práce jsme popsali výše v práci a zpracovali.

Literatura

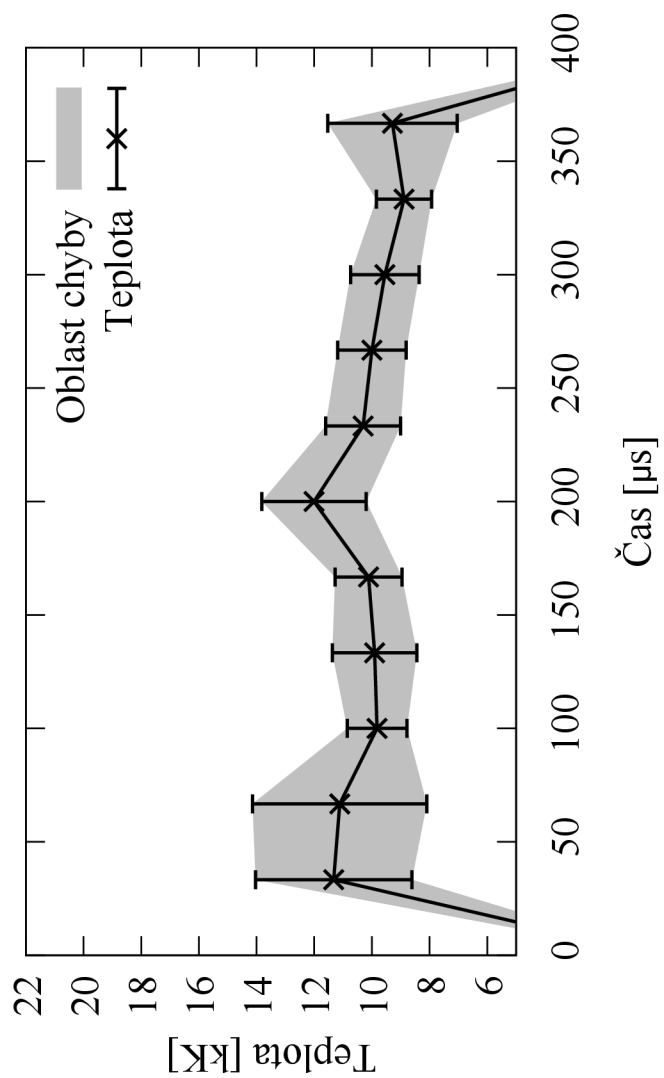
- [1] KRAMIDA, A., RALCHENKO, Yu., READER, J., and NIST ASD Team (2019). *NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.7.1)* [online]. 2019 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z URL:
<<https://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD>>.
- [2] *Základní pojmy kvantové fyziky, fotoelektrický jev* [online]. 2015 [cit. 2019-12-19]. Dostupné z URL:
<<https://docplayer.cz>>.
- [3] *Základy elektrotechniky a elektroniky: Corona Výboj* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z URL:
<<https://riverglennapts.com/cs/transmission-effect/919-corona-discharge-what-is-the-corona-effect.html>>.
- [4] *Katedra fyziky povrchů a plazmatu: Druhy elektrických výbojů* [online]. [cit. 2019-12-23]. Dostupné z URL:
<<https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/index.php?langen=0>>.
- [5] *Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.: Fyzika ionosféry* [online]. 2012 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z URL:
<<http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/iono/definice.html>>.
- [6] MARTIŠOVITŠ, Viktor.: *Základy fyziky plazmy* Bratislava, 2004. Učebný text pre 3. ročník magisterského štúdia. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzita Komenského.
- [7] CHEN, Francis F.: *Úvod do fyziky plazmatu* Praha: ACADEMIA, 1984.
- [8] *Úvod do fyziky plazmatu* [online]. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z URL:
<<http://mb5.cz/atrey/d/index.html%3Fp=0.html>>.

Seznam příloh

A Grafy teplot	59
A.0.1 První měření	59
A.0.2 Druhé měření	60
A.0.3 Třetí měření	69

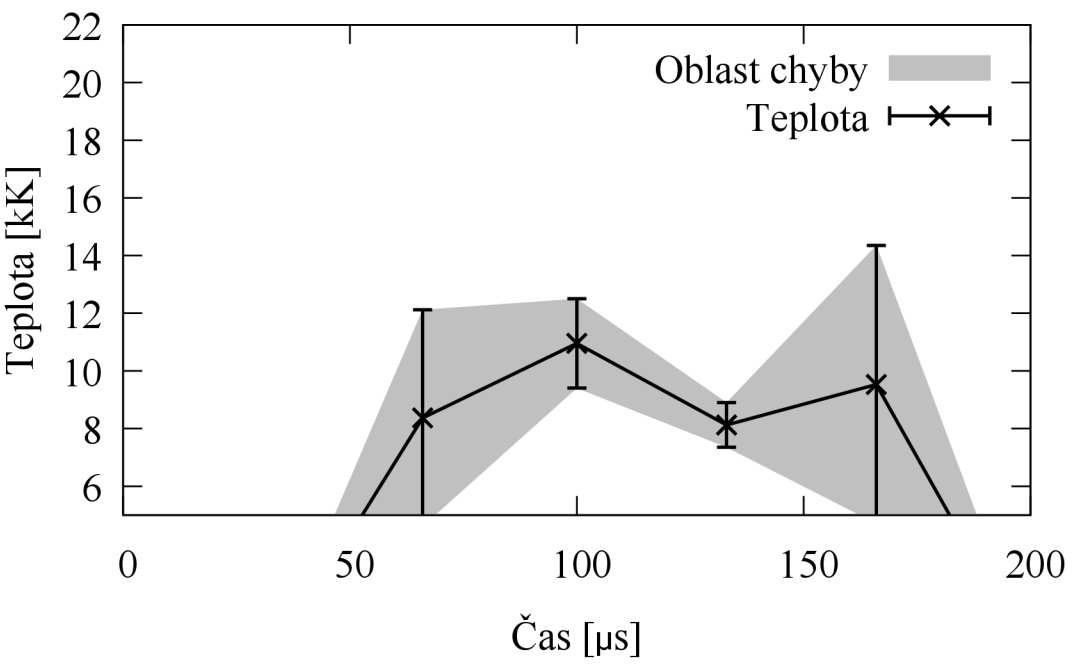
A Grafy teplot

A.0.1 První měření

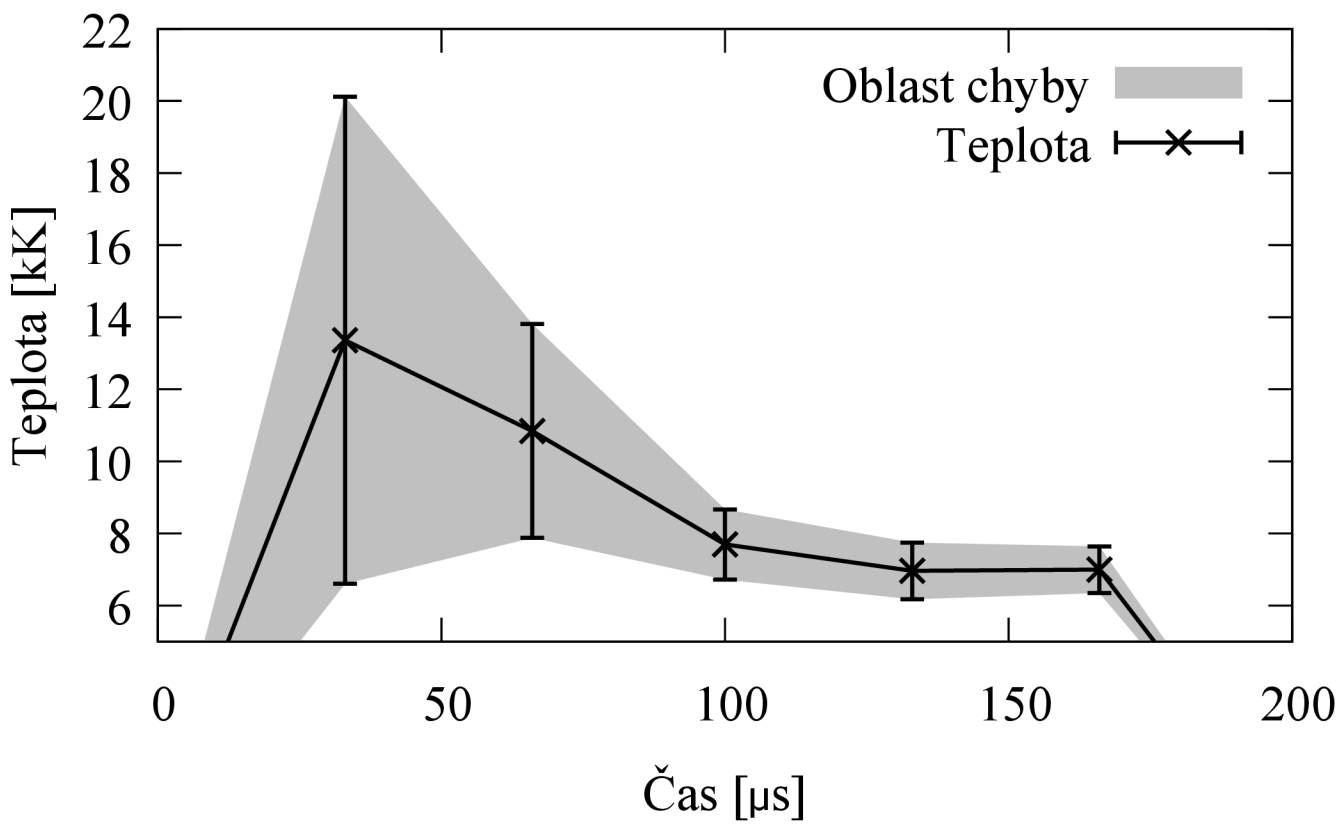


Obr. A.1: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro první měření.

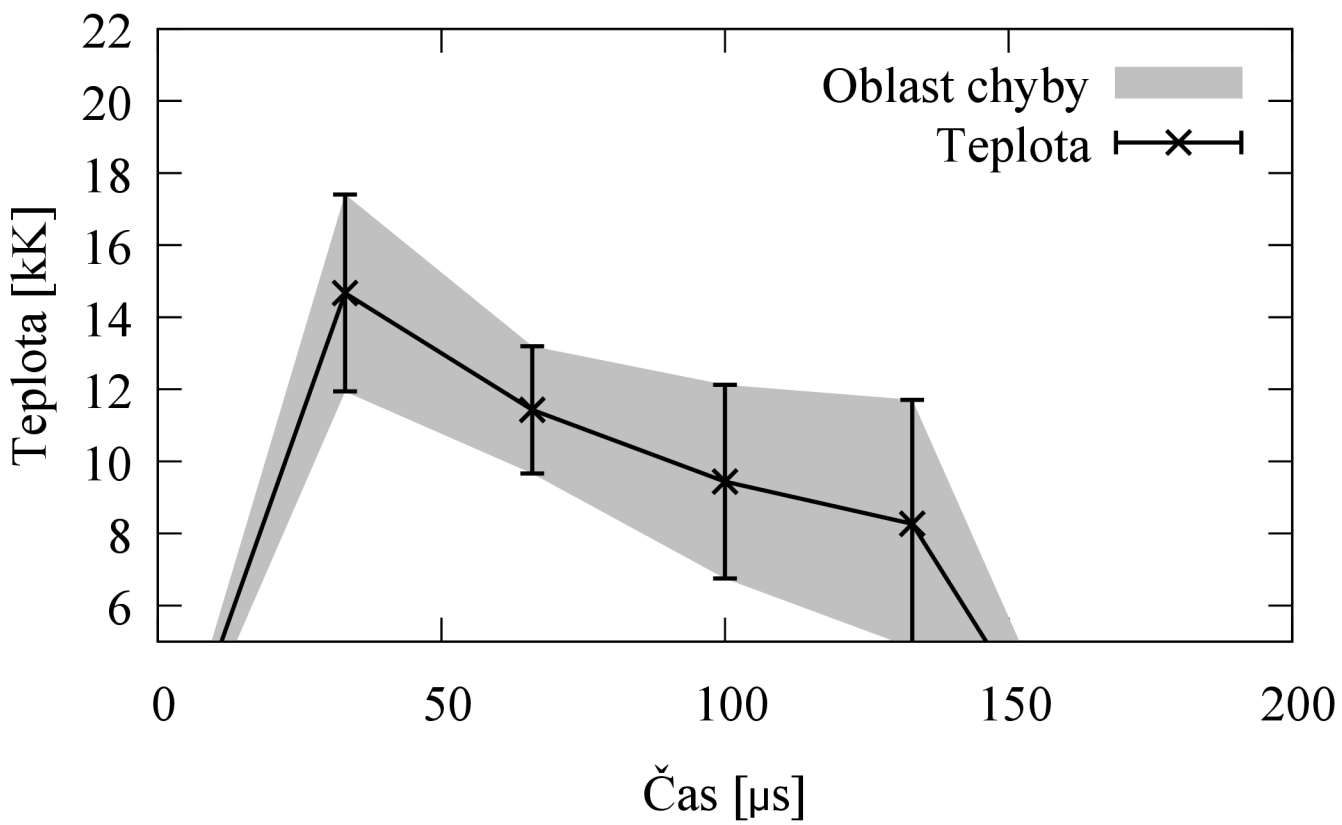
A.0.2 Druhé měření



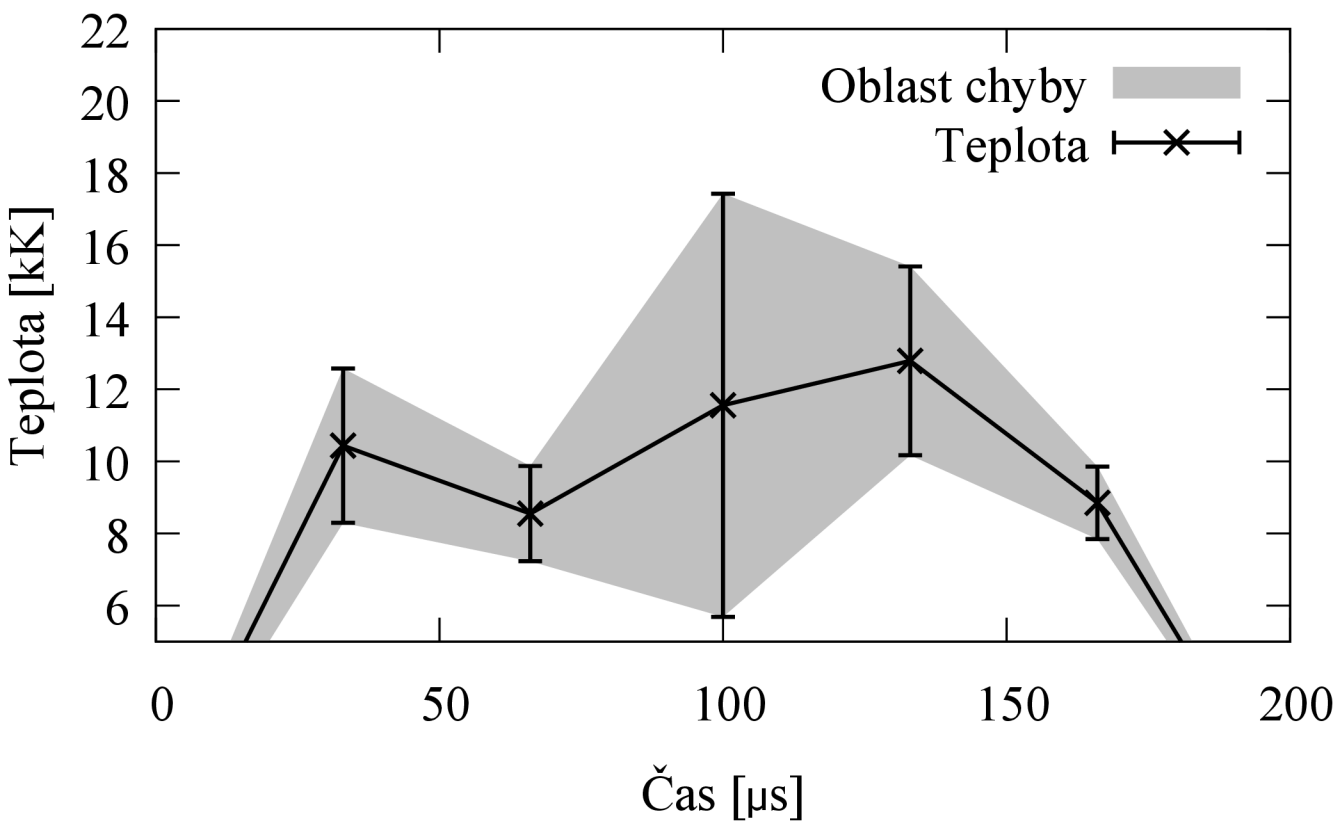
Obr. A.2: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření levý horní roh.



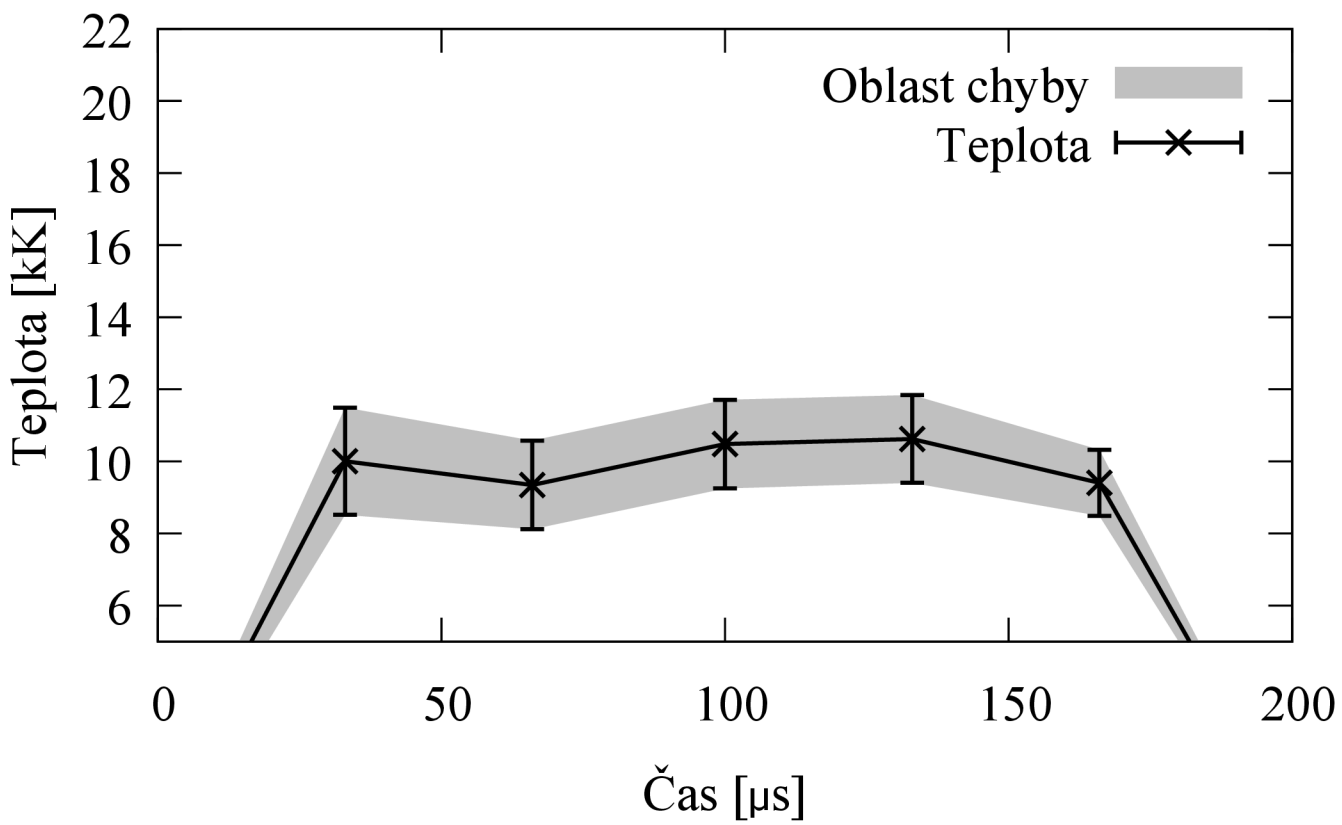
Obr. A.3: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření horní střed.



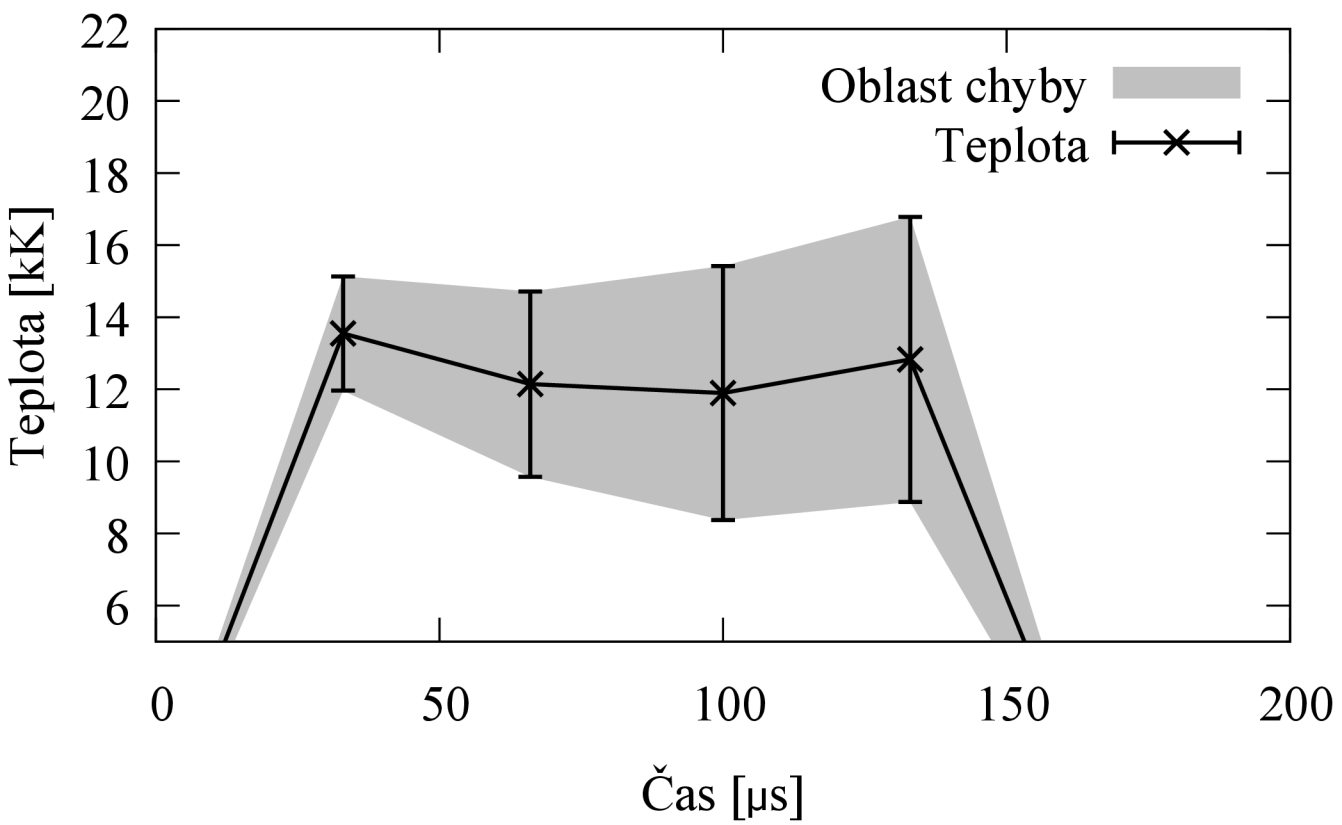
Obr. A.4: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření pravý horní roh.



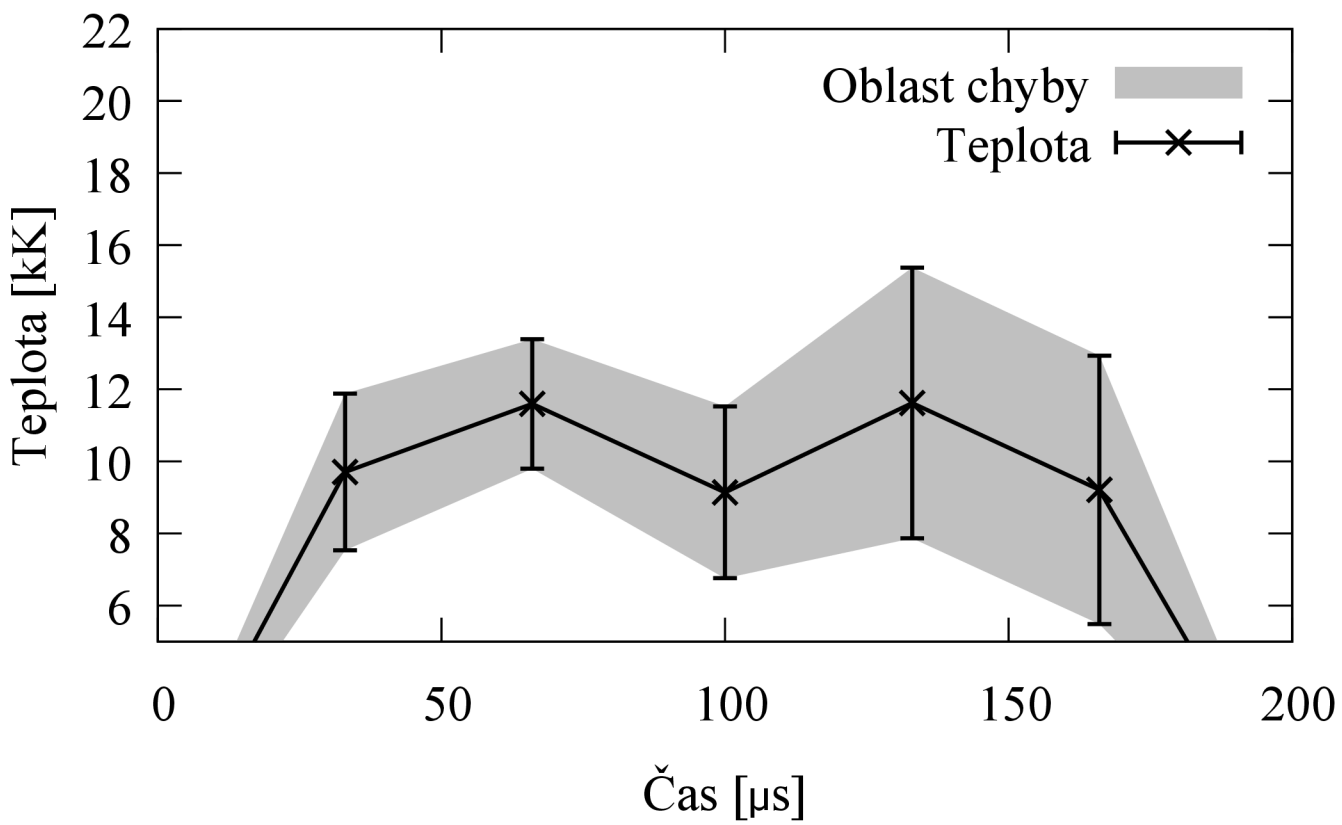
Obr. A.5: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření levá prostředí část.



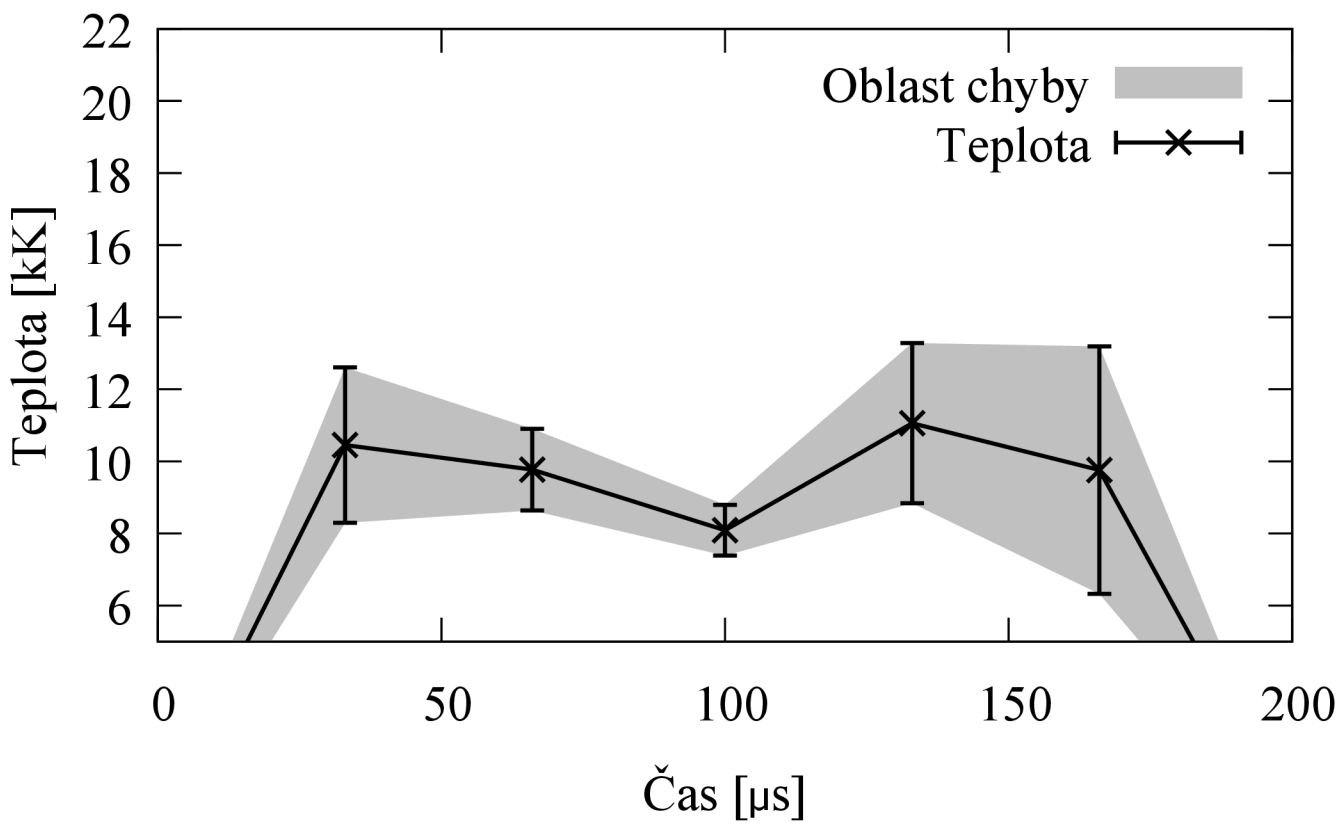
Obr. A.6: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření prostřední střed.



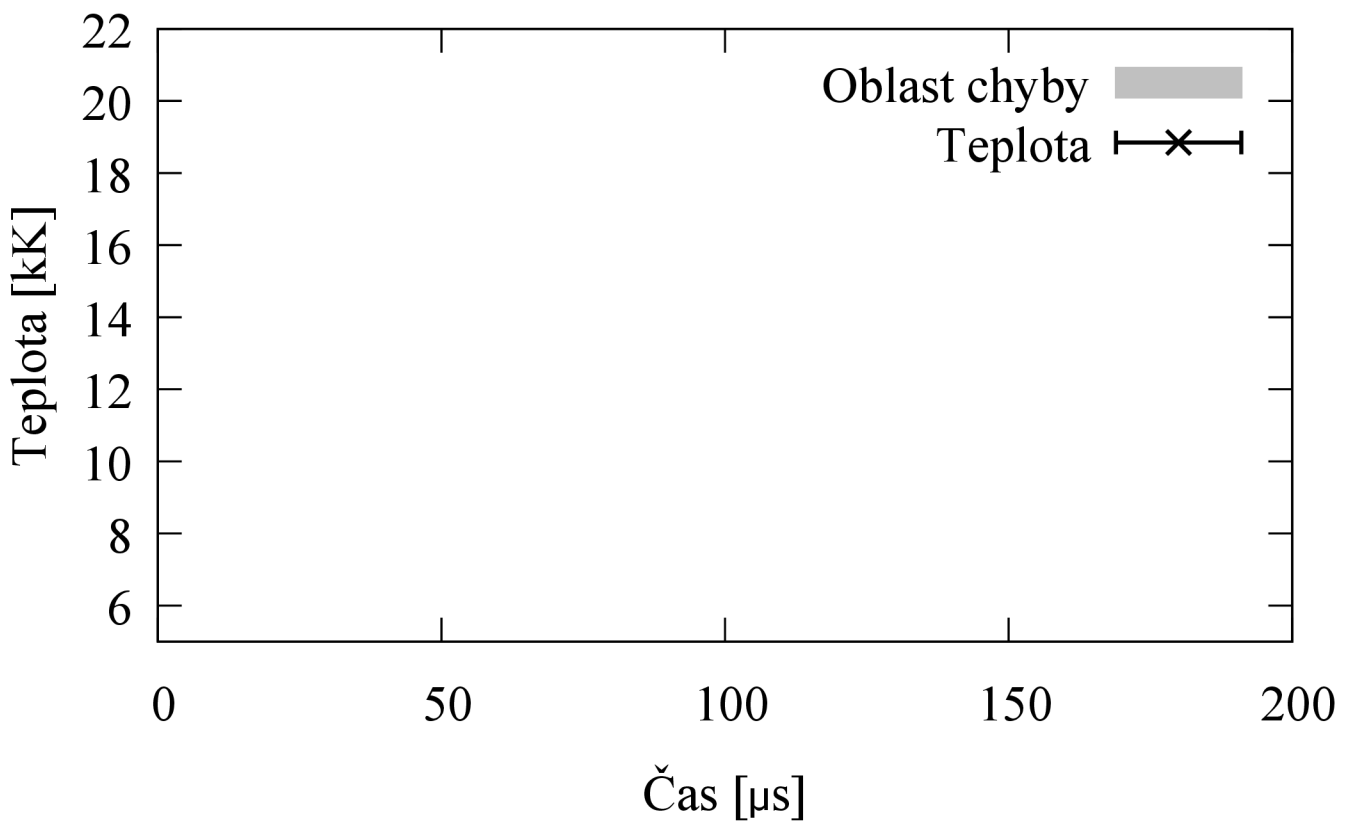
Obr. A.7: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření pravý prostředí část.



Obr. A.8: Příběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření levý dolní roh.

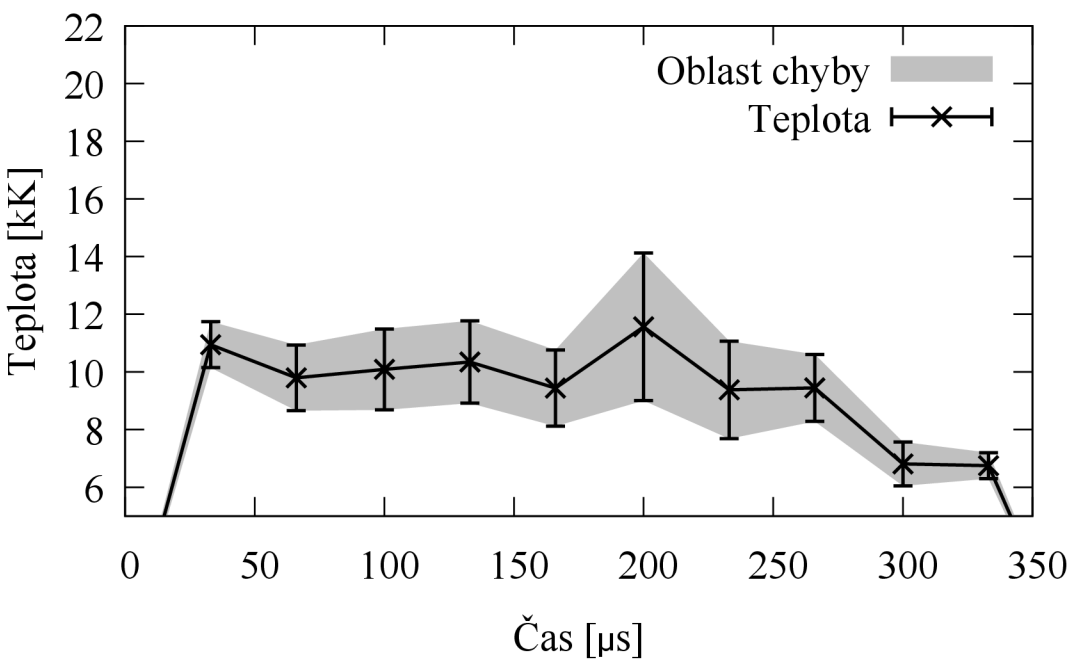


Obr. A.9: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření dolní střed.

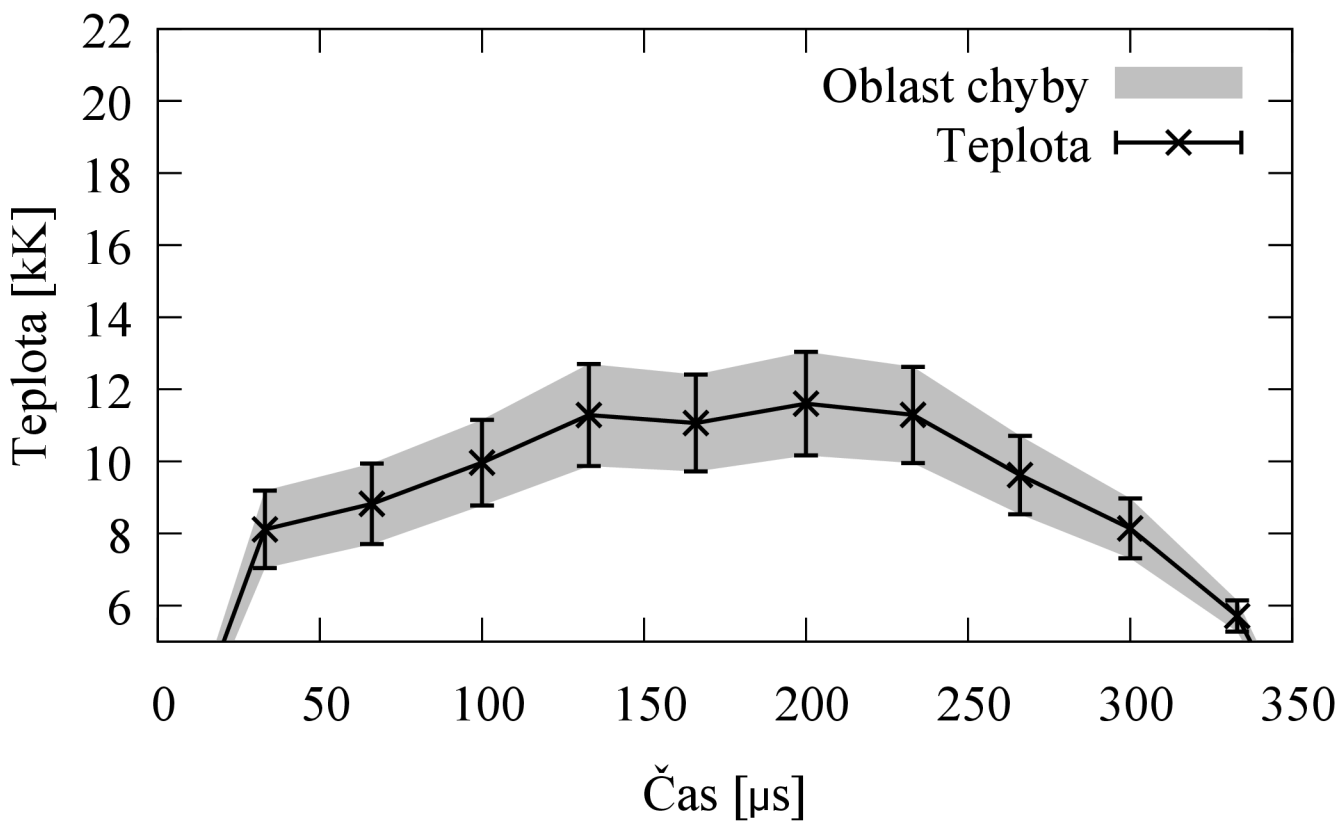


Obr. A.10: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro druhé měření pravý dolní roh.

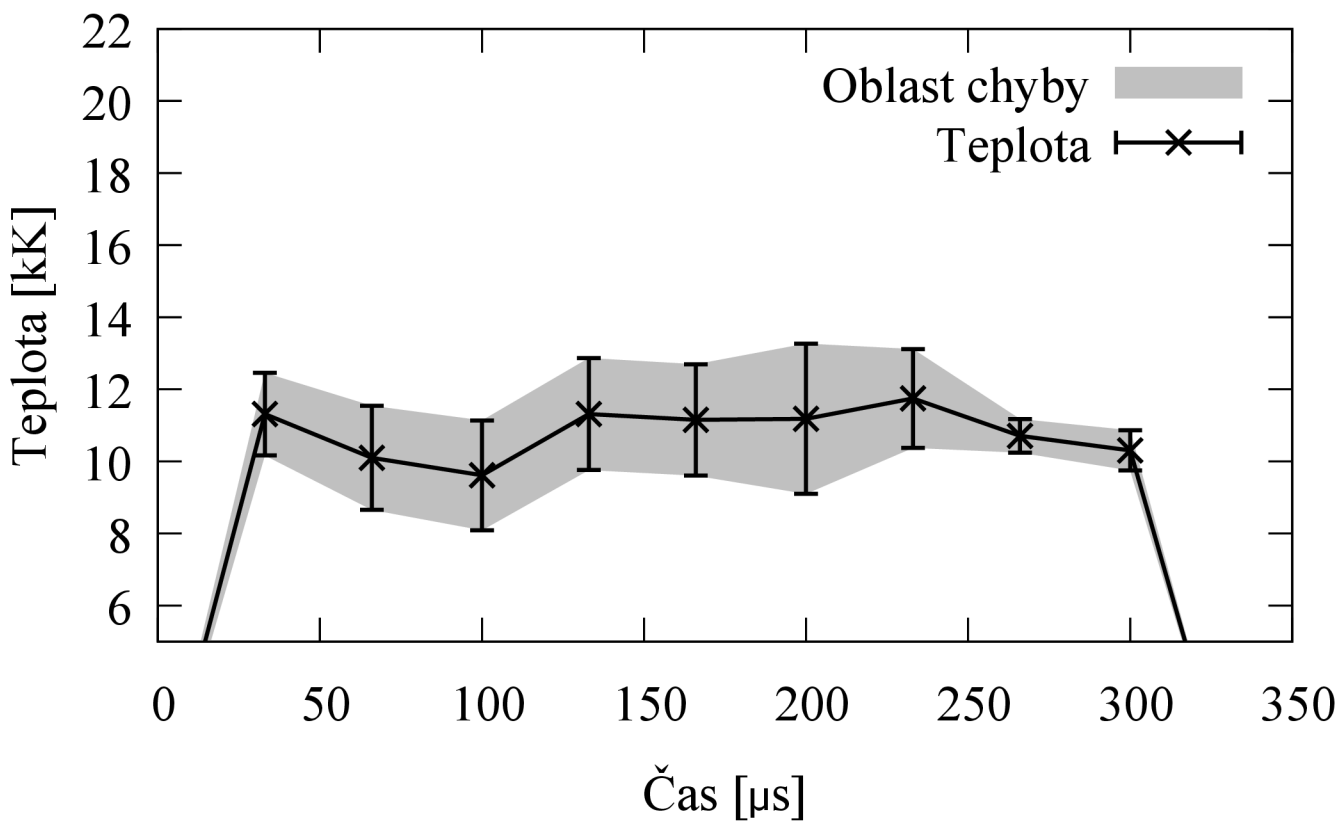
A.0.3 Třetí měření



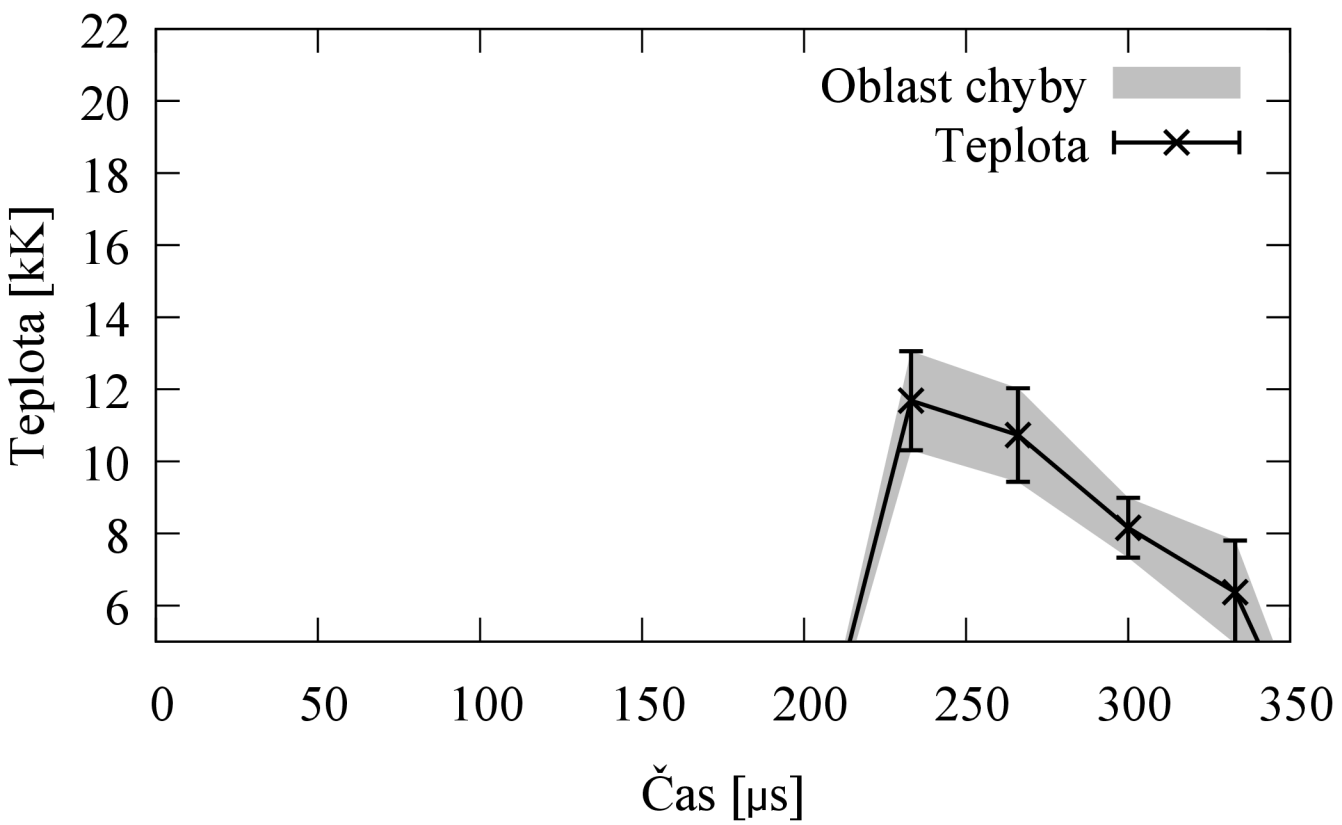
Obr. A.11: Příběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření levý horní roh.



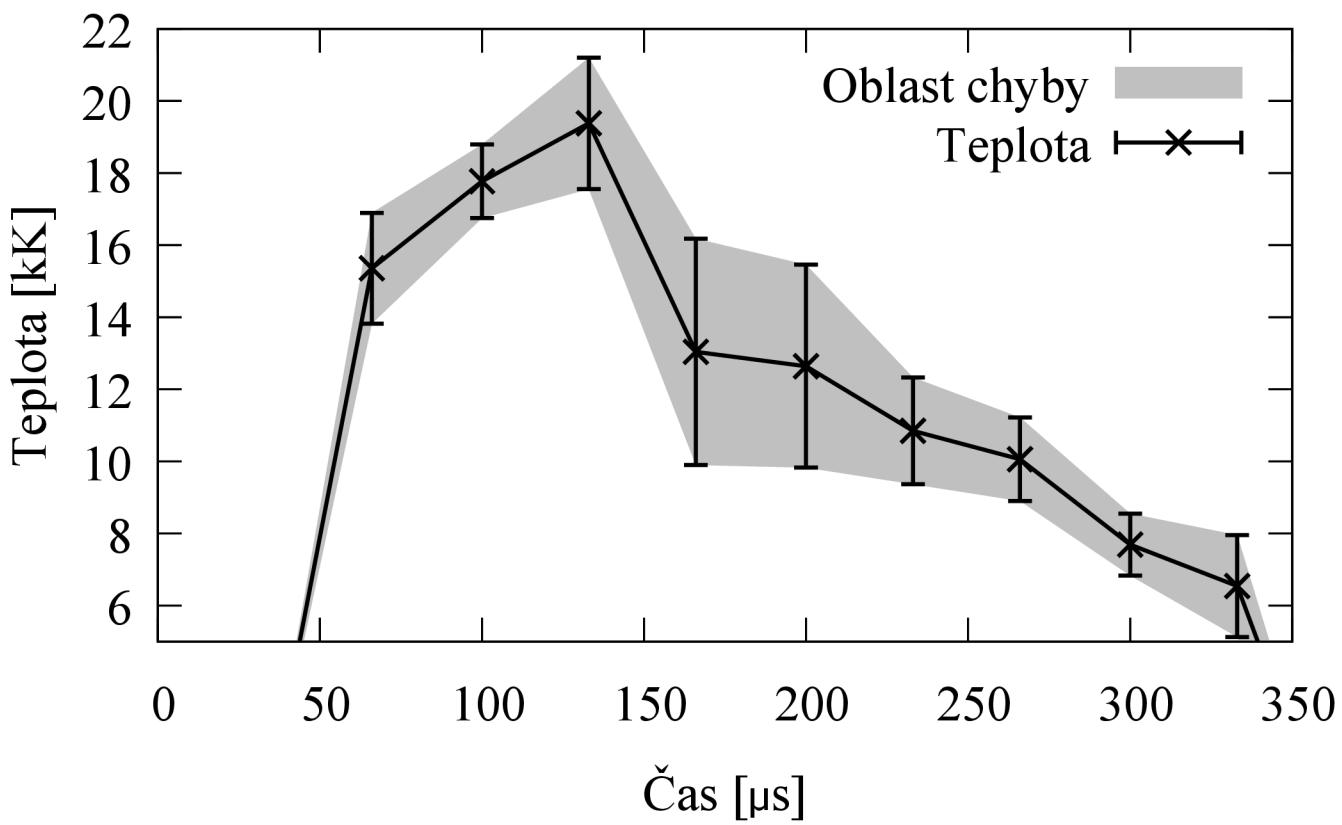
Obr. A.12: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření horní střed.



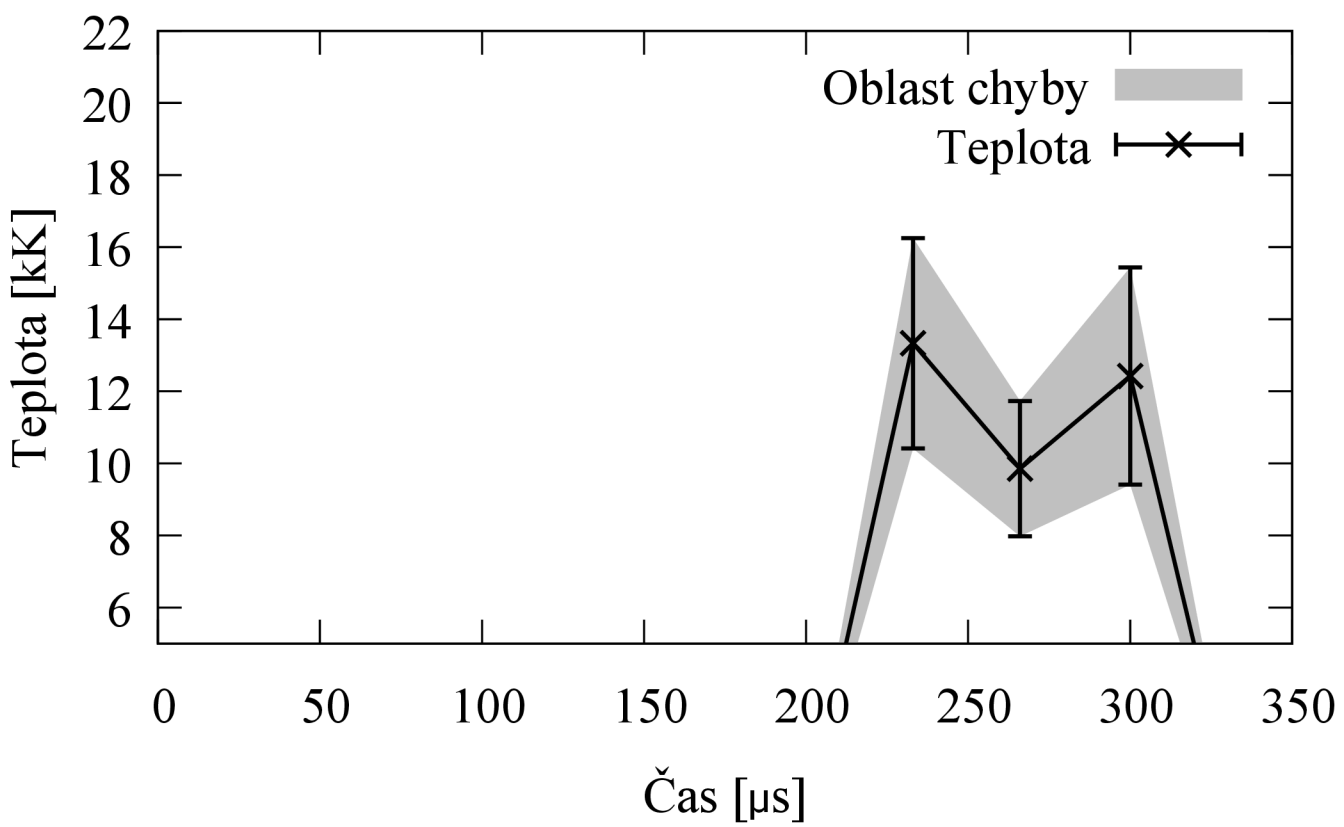
Obr. A.13: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření pravý horní roh.



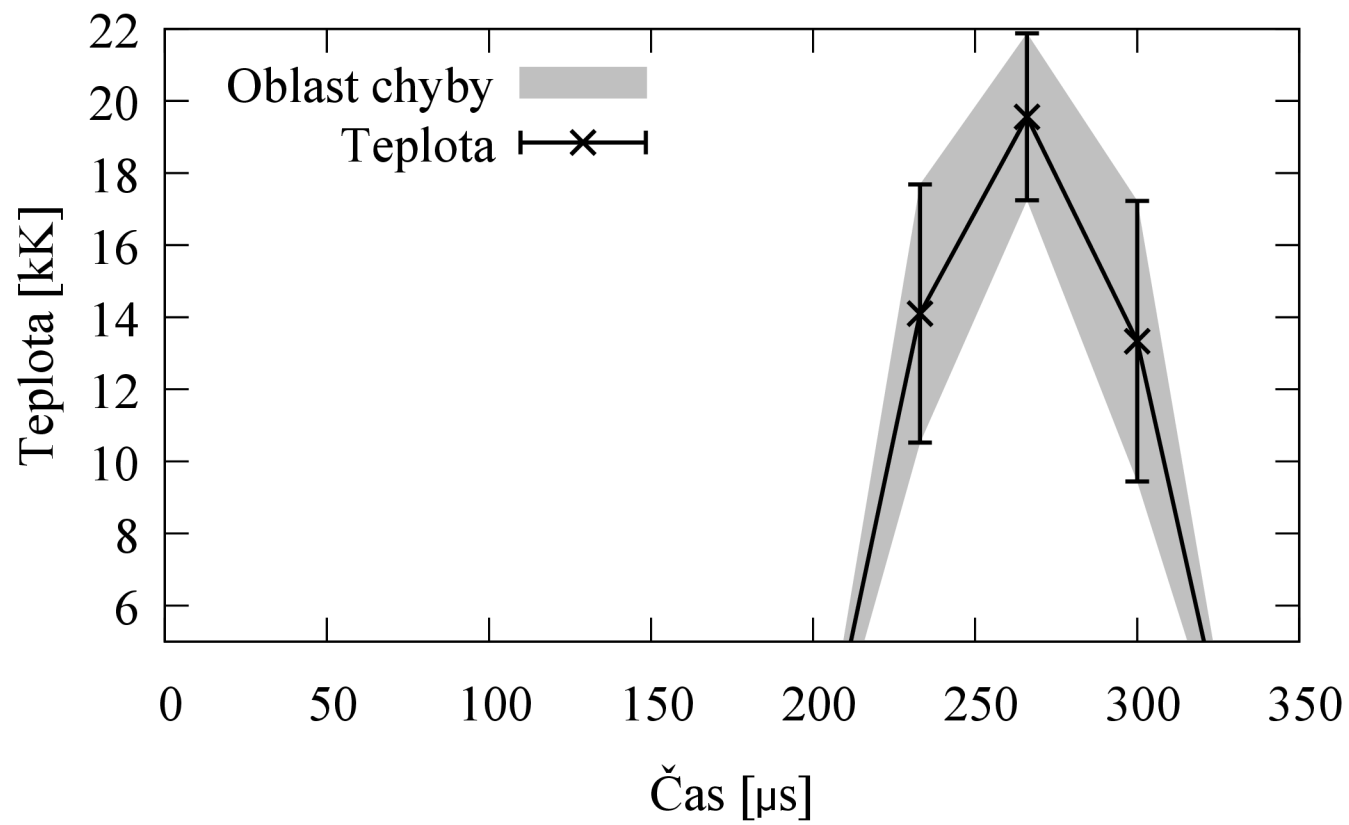
Obr. A.14: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro tří měření levá prostředí část.



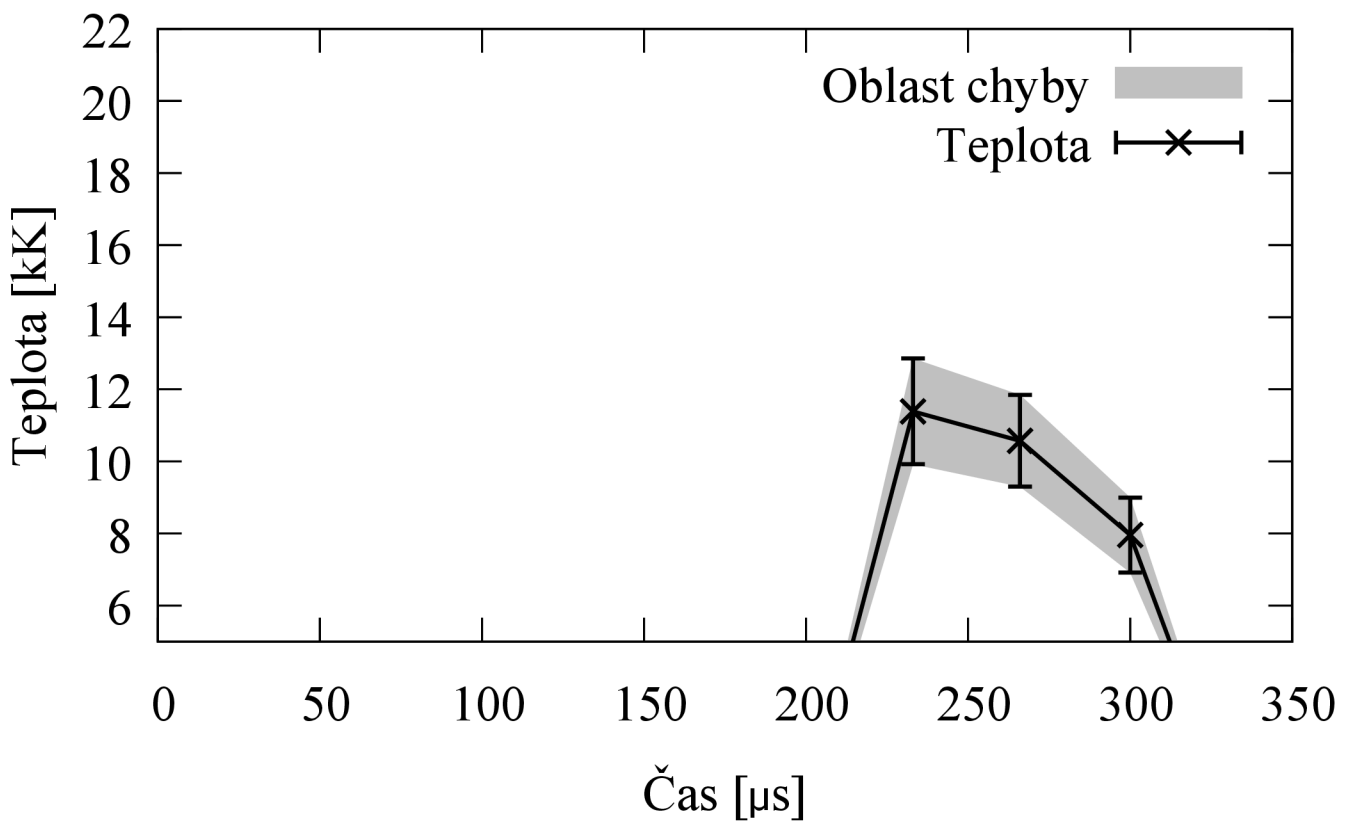
Obr. A.15: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření prostřední střed.



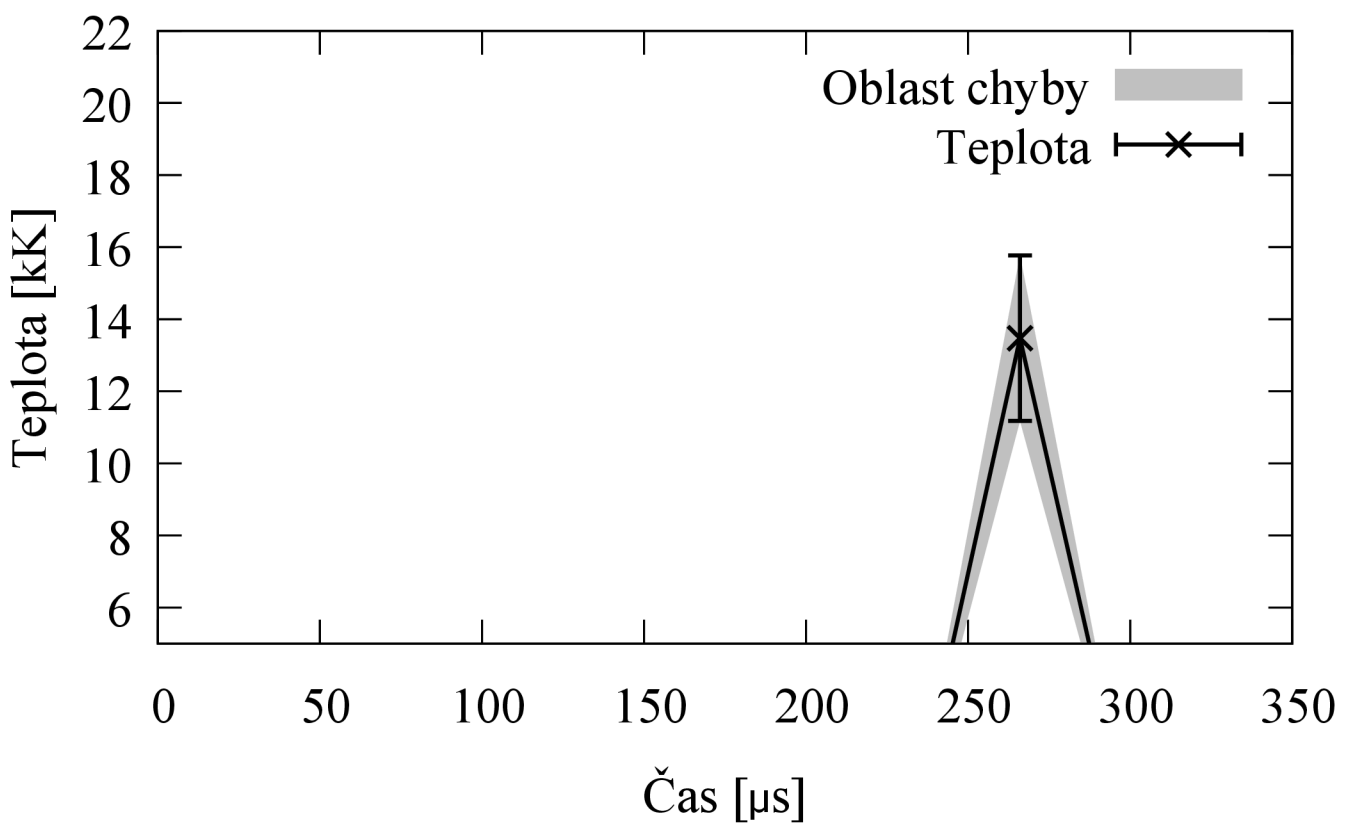
Obr. A.16: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření pravý prostředí část.



Obr. A.17: Příběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření levý dolní roh.



Obr. A.18: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření dolní střed.



Obr. A.19: Průběh teploty v čase včetně chybové úsečky pro třetí měření pravý dolní roh.