Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Vyhodnocení a analýza sondových charakteristik

Bakalářská práce

Jan Jedlička

školitel: Mgr. Martin Čada, Ph.D.

České Budějovice 2011

Jedlička J., 2011: Vyhodnocení a analýza sondových charakteristik.
[Evaluation and analysis of the probe characteristics. Bc. Thesis, in Czech.] – 62 p., Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace:
Cílem práce je vyhodnocení a analýza sondových charakteristik naměřených pomocí jednoduché Langmuirovy sondy v nízkoteplotním plazmatu. Součástí práce je také vytvoření grafického uživatelského rozhraní pro již existující vyhodnocovací program.

Annotation:
The aim of this work is evaluation and analysis of the probe characteristics measured using single Langmuir probe in low temperature plasma. Other part of this work is to develop a graphical user interface for already existing evaluation program.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

12. 12. 2011

.....

Jan Jedlička

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce Mgr. Martinu Čadovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky, odborné vedení, míru trpělivosti, se kterou mi pomohl vypracovat tuto bakalářskou práci. Dále děkuji své manželce, za její porozumění a shovívavost po celou dobu mého studia.

Obsah

1 Úvod 1

1.1 Co je plazma 1

1.2 Historie 1

1.3 Plazma kolem nás 2

1.4 Průmyslové aplikace plazmatu 3

1.5 Vlastnosti plazmatu 4

1.5.1 Kvazineutralita 4

1.5.2 Debyeova stínící délka 4

1.5.3 Stupeň ionizace plazmatu 5

1.5.4 Teplota plazmatu 6

1.5.5 Anizotermicita plazmatu 6

1.5.6 Plazmová frekvence 6

1.5.7 Podmínky zachování plazmatu 7

1.6 Diagnostika plazmatu 7

1.6.1 Základní diagnostické metody 8

2 Cíle práce 12

3 Získání dat 13

3.1 Langmuirova sonda 13

3.1.1 Tvar sondy a sondové charakteristiky 13

3.1.2 Pracovní režimy Langmuirovy sondy 15

3.1.3 Výhody a nevýhody sondové diagnostiky 17
3.1.4 Metoda dvojité sondy 17
3.2 Měřící aparatura 19
4 Vyhodnocování získaných dat 21
4.1 Program pro vyhodnocování dat „START.EXE“ 21
4.1.1 O programu 21
4.1.2 Funkce programu 21
4.2 Rozšíření programu „START.EXE“ 24
4.2.1 O GUI 24
4.2.2 Funkce GUI 24
4.2.3 Instalace GUI 24
4.2.4 Použití GUI 24
4.3 Postup vyhodnocování 29
5 Výsledky a diskuse získaných dat 31
6 Závěr 36
7 Zdroje 37
8 Přílohy 38
8.1 Příloha 1: Zdrojový kód - soubor “gui.frm”: 38
8.2 Příloha 2: Zdrojový kód - soubor “automatizator.au3”: 59

1 Úvod

Celá práce je rozdělena do několika kapitol. V úvodu se seznámíme s pojmem plazma, jeho historií, výskytem plazmatu, průmyslovým využitím, základními vlastnostmi a diagnostikou. Druhá kapitola obsahuje cíle práce. Třetí kapitola se zabývá získáním experimentálních dat. Podrobněji je zde popsána metoda diagnostiky Langmuirovou sondou a popsána měřící aparatura. Ve čtvrté kapitole je popsáno vyhodnocování získaných dat programem „START.EXE“ a rozšíření tohoto programu vytvořením grafického uživatelského rozhraní. V páté kapitole se seznámíme s výsledky a diskuzí získaných dat. Další kapitoly obsahují závěr, použité zdroje a přílohy.

1.1 Co je plazma

Plazma je označováno čtvrtým skupenstvím hmoty, po pevném, kapalném a plynném skupenství. Udává se, že 99 % hmoty ve vesmíru je tvořeno plazmatem. Hmota do skupenství plazmatu přechází např. v podmínkách, kdy energie okolních částic je větší než vazební energie elektronů v atomu. Vlivem této tepelné energie dochází k rozložení atomů na záporně nabité elektrony a kladně nabité ionty (tento jev se nazývá ionizace). Tyto nabité částice však nejsou zcela volné – jsou navzájem silně ovlivněny svými elektromagnetickými poli (pokud tyto pole nejsou odstíněny ostatními nabitými částicemi). Přesto tyto náboje již nejsou vázány a jejich seskupení je schopno kolektivního chování. Kolektivním chováním je myšlena reakce na elektromagnetické pole, ale také schopnost elektromagnetické pole generovat. Takové seskupení se nazývá plazma.[1]

1.2 Historie

Poprvé použil slovo plazma pro označení ionizovaného plynu americký chemik a nositel Nobelovy ceny Irving Langmuir roku 1927. Spolu se svým kolegou Lewi Tonksem zkoumali fyziku a chemii wolframového vlákna žárovky s cílem prodloužit jeho životnost. Při tomto zkoumání Langmuir vyvinul teorii vrstev prostorového náboje (space charge sheath) – mezní vrstva, která se tvoří mezi kvazineutrálním plazmatem a pevným povrchem. Rovněž objevil, že určité části plazmatu ve výbojové trubici vykazují periodické změny koncentrace elektronů, které nazýváme Langmuirovy vlny. Toto byl zrod plazmové fyziky.

1.3 Plazma kolem nás

- *Ionosféra* – horní část atmosféry Země (ve výškách 50 – 300 km) je částečně fotoionizována slunečním UV zářením
- *Sluneční vítr* – je proud nabitých částic vycházející ze Slunce
- *Van Allenovi radiační pásy* – oblasti v okolí planety, kde jsou magnetickým polem zachyceny částice Slunečního větru
- *Magnetická bouře* – oblak plazmatu uvolněný ze Slunce v době zvýšené sluneční aktivity reagující s magnetosférou Země
- *Hvězdy, včetně Slunce* – jsou velké plazmatické koule
- *Sluneční jádro* – plazma v jádru Slunce, kde probíhá termojaderná fúze vodíku tvořící helium a sluneční teplo
- *Mezihvězdný a mezigalaktický prostor*
- *Blesk* – jeho vodivý kanál
- *Fluorescenční lampy, zářivky*
- *Svařování a řezání plazmatem*
- *Korónový výboj při kopírování textu či obrazů*
- *Plazmová zobrazovací zařízení*
- *Sterilizace*
- *Laboratorní výboje* – plazma vytvořené v laboratoři elektrickým proudem protékajícím skrz horký plyn – vakuové trubice, jiskřiště, svařovací elektrické oblouky, neonové a fluorescenční světla
- *Experimenty termonukleární jaderné fúze* – plazma, ve kterém jsou prováděny experimenty kontrolované termojaderné fúze, například tokamak
- *Průmyslové aplikace*

Plazma	n_e [m^{-3}]	T [K]	B [T]	λ_D [m]	N_D	ω_p [s^{-1}]
Výboje v plynu	10^{16}	10^4	–	10^{-4}	10^4	10^{10}
Tokamak	10^{20}	10^8	10	10^{-4}	10^8	10^{12}
Ionosféra	10^{12}	10^3	10^{-5}	10^{-3}	10^5	10^8
Magnetosféra	10^7	10^7	10^{-8}	10^2	10^{10}	10^5
Sluneční jádro	10^{32}	10^7	–	10^{-11}	1	10^{18}
Sluneční vítr	10^6	10^5	10^{-9}	10	10^{11}	10^5
Mezihvězdný prostor	10^5	10^4	10^{-10}	10	10^{10}	10^4
Mezigalaktický prostor	1	10^6	–	10^5	10^{15}	10^2

Tabulka 1: Příslušné hodnoty pro prostředí: koncentrace elektronů, teplota, intenzita magnetického pole, Debyeovo délka, počet částic v Debyeovo vrstvě, plazmová frekvence. Upraveno z [10].

1.4 Průmyslové aplikace plazmatu

Pomocí plazmatu lze několikanásobně zvýšit užitnou i finanční hodnotu prostého materiálu. Toto se děje především pomocí depozice tenkých vrstev na podkladový materiál, tzv. substrát. Plazma je však také schopné vrstvy odstraňovat, toho se využívá např. při plazmovém leptání.

1. *Plazmové leptání*

   Toto je jeden ze základních prostředků, který umožnil další zmenšování integrovaných obvodů. V porovnání s leptáním kyselinou, kdy dochází k podleptávání, lze pomocí leptání plazmatem dosáhnout menších rozměrů a nedochází při něm k podleptávání.[4] Odpadá rovněž tolik nebezpečný odpad po leptání kyselinou.

2. *Depozice tenkých vrstev*

   Pomocí tohoto procesu se sice mění pouze povrch prostého materiálu, ale přitom dojde k celkové změně chování takového povrchu. Cíleně deponovaná vrstva může např. radikálně změnit tvrdost povrchu, jeho smáčivost, elektrickou vodivost, atp. Před depozicí tenkých vrstev má prostý materiál určité vlastnosti, nicméně některé požadované vlastnosti mu mohou chybět. Právě depozicí tenkých vrstev na prostý

materiál mu můžeme poskytnout vlastnosti námi požadované. Uveďme si např. magnetická média pro záznam (magnetické pásky, magnetické pevné disky), optická média pro záznam (CD, DVD), křemíkové integrované obvody (např. procesor obsahuje v jedné vrstvě 10^8 MOS tranzistorů, a v dalších 6-8 vrstvách kov a v dalších 6-8 vrstvách izolátor, pomocí kterých se vytvoří spojení tranzistorů a tím vznikne procesor).

3. *Ničení nebezpečných chemikálií*

   Pro přiblížení: toxický plyn proudí do plazmatu a vychází jako bezpečný plyn, který je možné vypustit do atmosféry. Ve srovnání s ostatními metodami ničení nebezpečných plynů vzniká při ničení plazmatem méně nebezpečných vedlejších produktů a množství zpracovaného plynu za sekundu je větší za využití nižších reaktorových teplot (např. eliminace SO_x a NO_x umožňuje uhelným elektrárnám spalování levnějšího uhlí s větším obsahem síry, aniž by docházelo k překročení limitů).

4. *Čištění povrchů, sterilizace, modifikace pro biokompatibilitu či barviva*

   Upravovaný materiál se vloží do reaktoru s plazmatem určitého plynu a tam je ponechán po určitou dobu. Vybraný plyn reaguje s povrchem. V případě čištění jsou povrchové nečistoty zplyněny a odstraněny.

1.5 Vlastnosti plazmatu

1.5.1 Kvazineutralita

Plazma vykazuje zajímavou vlastnost kvazineutralitu. Je to stav, kdy je velikost náboje záporně nabitých částic $\boldsymbol{n_e}$ rovna velikosti náboje kladně nabitých částic $\boldsymbol{n_i}$ a plazma tak navenek vypadá jako elektricky neutrální.

$$n_e \cong n_i$$

1.5.2 Debyeova stínící délka

Plazma má schopnost odstínit vložené elektrické pole (viz Obrázek 1-1). Pokud do plazmatu umístíme nabitou elektrodu, bude tato elektroda obklopena prostorovým nábojem opačné polarity, který bude exponenciálně zeslabovat účinky elektrického pole elektrody, takovým

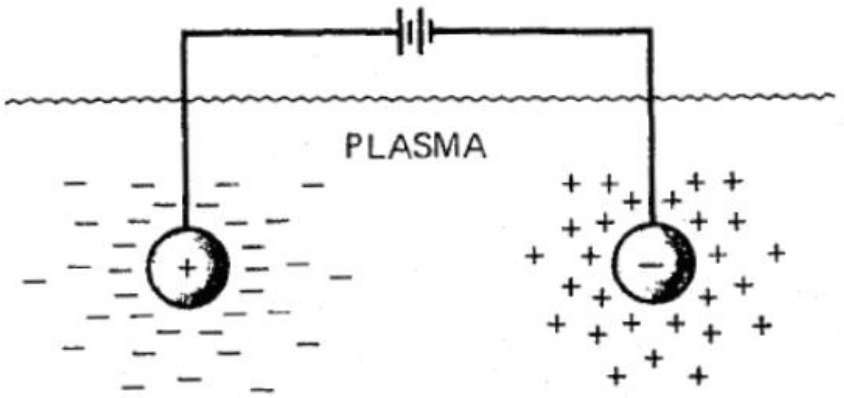
způsobem, že v určité vzdálenosti $\boldsymbol{\lambda_D}$, již účinky elektrického pole elektrody nebudou působit – jsou odstíněny. Této vzdálenosti říkáme Debyeova stínící délka $\boldsymbol{\lambda_D}$.

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \, k_B \, T_e}{e^2 \, n_e}} \; [m]$$

Kde $\boldsymbol{\varepsilon_0}$ je permitivita vakua, $\boldsymbol{k_B}$ Boltzmannova konstanta, $\boldsymbol{T_e}$ teplota elektronů, $\boldsymbol{e}$ je náboj elektronu a $\boldsymbol{n_e}$ koncentrace elektronů.

Počet částic v Debyeovo vrstvě – je počet částic $\boldsymbol{N_D}$ ve vrstvě s poloměrem $\boldsymbol{\lambda_D}$

$$N_D = \frac{4\pi}{3} \, n_e \, \lambda_D^3$$



Obrázek 1-1: Ukázka Debyeova stínění nabitých elektrod v plazmatu. Převzato z [8].

1.5.3 Stupeň ionizace plazmatu

Parametr určující množství nabitých částic v plazmatu je stupeň ionizace plazmatu $\boldsymbol{\alpha}$. Je definován jako podíl počtu nabitých částic $\boldsymbol{n_i}$ a počtu neutrálních částic $\boldsymbol{n_a}$:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_a}$$

Plazma podle stupně ionizace $\boldsymbol{\alpha}$ rozdělujeme na:

- *slabě ionizované plazma* $\alpha \ll 1$
- *silně (plně) ionizované plazma* $\alpha \leq 1$

1.5.4 Teplota plazmatu

Obvykle vyjadřuje tepelnou kinetickou energii $\boldsymbol{T_e}$ elektronů, kde $\boldsymbol{m_e}$ je hmotnost elektronu, $\boldsymbol{v_e^2}$ je střední kvadratická rychlost elektronů (obvykle měřeno v eV, kde 1 eV = 11600 °K).

$$E = \frac{3}{2} k_B\, T_e \quad \text{a} \quad E = \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

$$\frac{3}{2} k_B T_e = \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

$$k_B T_e = \frac{1}{3} m_e\, v_e^2$$

Podle teploty plazmatu můžeme plazma dělit na:

- *plazma v kompletní termodynamické rovnováze (CTE)* $T_e = T_i$
- *plazma v lokální termodynamické rovnováze (LTE)* $T_e = T_i$ *v malé oblasti*
- *plazma mimo termodynamickou rovnováhu (non-LTE)* $T_e \gg T_i$

a také na:

- *vysokoteplotní plazma* $T_e \geq 100\ eV$
- *nízkoteplotní plazma* $T_e < 100\ eV$

1.5.5 Anizotermicita plazmatu

Jedná se o parametr, který určuje poměr teploty elektronů k teplotě iontů.

$$\tau = \frac{T_e}{T_i}$$

Plazma podle anizotermicity rozdělujeme na:

- *plazma neizotermické* $\tau \ll 1$
- *plazma izotermické* $\tau = 1$

1.5.6 Plazmová frekvence

Též nazývána Langmuirovy vlny. Jedná se o tlumené kmity, způsobené poruchou v plazmatu, které mají úhlovou plazmovou frekvenci $\boldsymbol{\omega_p}$.

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}\right)^{\frac{1}{2}} = 5{,}64\ x\ 10^{11} \left(\frac{n_e}{10^{20}}\right)^{\frac{1}{2}}\ [rad/s]$$

Mezi plazmovou frekvencí $\boldsymbol{\omega_p}$ a Debyeovo stínící délkou $\boldsymbol{\lambda_D}$ existuje následující vztah[6]:

$$\omega_p \lambda_D = v_e$$

1.5.7 Podmínky zachování plazmatu

1. Velikost oblasti plazmatu $\boldsymbol{L}$ musí být mnohonásobně větší než Debyeovo stínící délka $\boldsymbol{\lambda_D}$

$$L \gg \lambda_D$$

2. Počet Debyeovo částic $\boldsymbol{N_D}$ musí být mnohonásobně větší než 1

$$N_D \gg 1$$

3. Násobek střední doby srážek s neutrálními atomy $\boldsymbol{v_{en}}$ a úhlové plazmové frekvence $\boldsymbol{\omega_{pe}}$ musí být větší než 1

$$\omega_{pe} v_{en} > 1$$

1.6 Diagnostika plazmatu

Diagnostikou plazmatu se rozumí experimentální metody na určování parametrů plazmatu. Mezi nejdůležitější zjišťované parametry plazmatu patří:

- *koncentrace nabitých částic*
- *střední kinetická energie nabitých částic (teplota)*
- *chemické složení plazmatu – druhy a koncentrace iontů*
- *druhy a koncentrace excitovaných stavů molekul a iontů*
- *intenzita elektrického a magnetického pole v plazmatu*

Diagnostika plazmatu je celý obor ve fyzice plazmatu, který má svoje vlastní metody i teorie. Diagnostické metody dělíme na aktivní (kontaktní) a pasivní (bezkontaktní). Volba správné diagnostické metody nespočívá jen v její dostupnosti a počtu získaných parametrů, ale i na stupni ovlivnění parametrů plazmatu samotným měřením.

1.6.1 Základní diagnostické metody

Základní diagnostické metody dělíme podle stupně ovlivnění měřeného plazmatu na *pasivní metody*, které svým působením měřené plazma neovlivňují, a *aktivní metody*, které přímo ovlivňují měřené plazma a měří zpětnou odezvu.

Pro naše účely diagnostické metody rozdělíme podle způsobu měření:

- *Elektrostatické sondy* – pracují na principu snímání proudu tekoucího z plazmatu do sondy
- *Mikrovlnné metody* – jsou založeny na měření dielektrických vlastností plazmatu
- *Optické metody* – jejich princip spočívá na měření emise nebo absorpce světla ve výboji
- *Korpuskulární (částicové) metody* – tyto metody měří přímo atomy, molekuly nebo ionty vyskytující se v plazmatu

1.6.1.1 Elektrostatické sondy

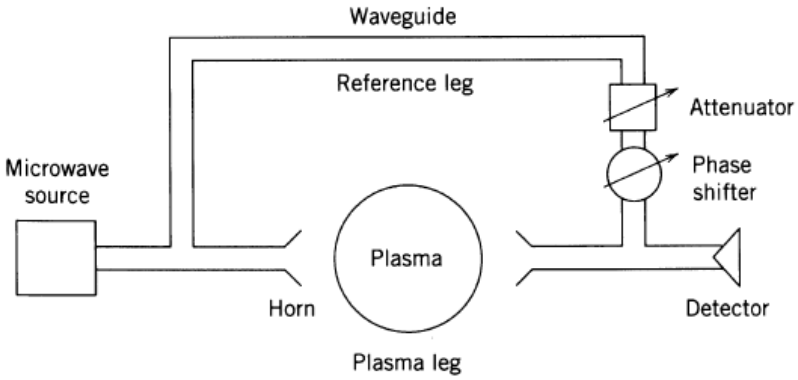
Hlavním představitelem elektrostatické sondy je *Langmuirova sonda*, kterou se budeme podrobněji zabývat v dalším oddílu (3.1 Langmuirova sonda). Jedná se o sondu, kterou tvoří většinou drát, vystavený přímému působení plazmatu. Na sondě je měněn potenciál vůči referenční elektrodě s mnohem větší plochou než sonda. A zároveň je měřen proud sondou protékající.

Dalším představitelem je *emisní sonda*. Jedná se o elektrostatickou sondu skládající se z elektrody vystavené plazmatu, která je elektricky zahřívána tak, že dochází k emisi elektronů do plazmatu. V případě, že elektrony neemituje, pracuje jako Langmuirova sonda. Emisí elektronů se neutralizuje prostorový náboj v okolí sondy a tím je na sondě plovoucí potenciál, který se blíží potenciálu plazmatu. Lze jej měřit bez nutnosti jakkoliv upravovat data.

1.6.1.2 Mikrovlnné metody

Jedním z představitelů je *mikrovlnný interferometr*. Pomocí této metody se určuje koncentrace elektronů v plazmatu. Princip metody spočívá v interakci slabého

vysokofrekvenčního pole s elektrony plazmatu. Neboli průchodem mikrovlnného signálu plazmatem dochází k posunu fáze signálu. Změřením posunu fáze jsme schopni určit dielektrickou konstantu plazmatu ε_{pl} a z ní pak vypočítat koncentraci elektronů v plazmatu (viz Obrázek 1-2).



Obrázek 1-2: Mikrovlnný interferometr. Převzato z [4].

Dalším představitelem je *„Hairpin" sonda*. „Hairpin" rezonanční sonda je čtvrtvlnné paralelní přenosové vedení, které má jeden konec otevřený, zatímco druhý konec je zkratovaný, takže se podobá vlasové sponce. Sonda rezonuje na frekvenci, která je závislá na délce a relativní permitivitě prostředí obklopující sondu. Při vložení sondy do plazmatu se její rezonanční frekvence zvýší, neboť permitivita plazmatu je menší než permitivita vakua. Z tohoto frekvenčního posunu lze snadno určit koncentraci elektronů.

1.6.1.3 Optické metody

Hlavním představitelem optických metod je *optická emisní spektroskopie (OES)*. Tato metoda využívá pro svoji potřebu vyzařování plazmatu ve viditelné oblasti světla, případně i v ultrafialové a infračervené oblasti spektra. Jedná se o vyzařování způsobené přechodem atomů, iontů či molekul z excitovaného stavu do nižšího energetického stavu. Pomocí této metody lze určovat relativní koncentrace excitovaných stavů s krátkou dobou života (< 100 ns). Rovněž ji lze využít pro určení chemického složení částic v plazmatu.

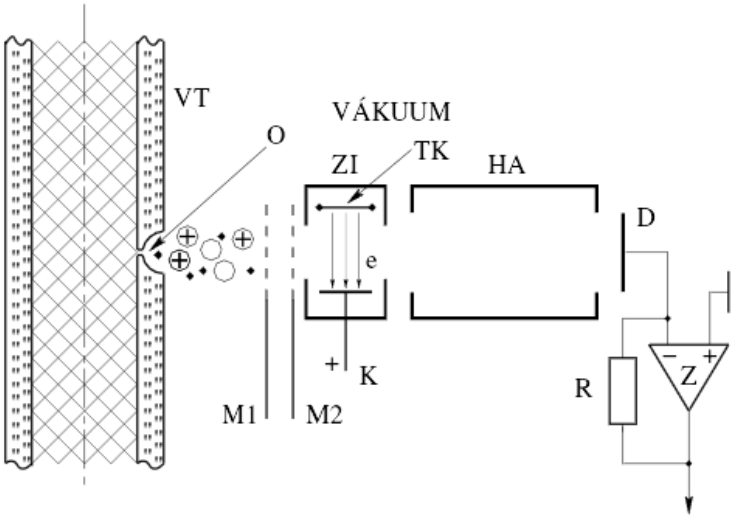
Dalším představitelem optických metod je *absorpční spektroskopie*. Metoda je založena na měření poklesu signálu laserového záření procházejícího zkoumaným médiem. Tento pokles je zapříčiněn absorpcí fotonu dané vlnové délky laserového paprsku částicemi v jistém excitovaném stavu. Tyto částice pak mohou přejít do vyššího excitovaného stavu nebo díky stimulované emisi přejít do nižšího či základního kvantového stavu

doprovázeného vyzářením fotonů. Tedy podobně jako optická emisní spektroskopie může tato metoda pro svoji potřebu využívat vyzařování plazmatu. Pomocí této metody lze určovat relativní koncentrace např. metastabilních částic nebo částic rozprášených z katody.

Mezi optické metody patří i *laserem vyvolaná fluorescence (LIF)*. Jedná se o optickou diagnostickou metodu, kterou lze použít pro vizualizaci proudění, měření rychlosti, koncentrace, teploty a tlaku plazmatu. V podstatě jde o rozšíření optické emisní spektroskopie, kdy studované částice plazmatu tvoří fluorescenční médium, které po excitaci laserem spontánně vyzařuje fluorescenční záření.

1.6.1.4 Korpuskulární (částicové) metody

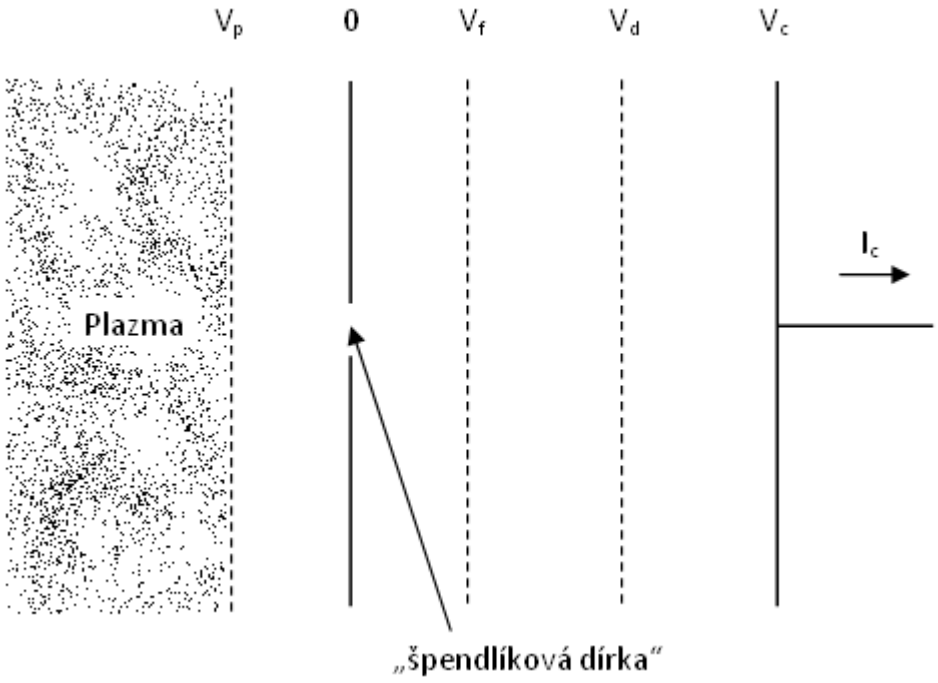
Hlavním představitelem těchto metod je *hmotnostní spektrometr.* Hmotnostní spektroskopie se používá k detekci částic určité hmotnosti. Přičemž je zlomek částic plazmatu odčerpán do vysokého vakua, kde iontová optika zajistí správný průchod měřených částic do energetického analyzátoru. V případě zjišťování neutrálních částic jsou tyto částice v hmotnostním spektrometru ionizovány zdrojem iontů. Poté jsou vyšetřeny hmotnostním analyzátorem a následně detekovány detektorem (viz Obrázek 1-3).



Obrázek 1-3: Aparatura na korpuskulární diagnostiku: VT – výbojka, O – difúzní otvor ve stěně výbojky, M1 a M2 elektrody na oddělení nabitých částic, ZI – zdroj iontů, TK – žhavená katoda na emisi elektronů, e – elektronový svazek, K – kolektor, HA – hmotnostní analyzátor, D – detektor nabitých částic, Z – zesilovač na měření malých proudů, R – vysokoohmový rezistor. Převzato z [5].

Mezi korpuskulární metody lze zařadit i *Retarding field energy analyzer (RFEA)* někdy označován též *Retarding potential analyzer (RPA)*. Tato metoda je nejlépe využitelná pro

měření energetické distribuční funkce iontů. Její princip je jednoduchý. Částice plazmatu opustí komoru „špendlíkovou dírkou“ a dopadnou na kolektor (viz Obrázek 1-4). Na kolektoru je pevně nastaveno napětí a měří se procházející proud. Mezi kolektorem a „špendlíkovou dírkou“ jsou ještě vloženy 2 mřížky, každá má různý potenciál, podle toho, jaké částice chceme měřit. Mřížka V_f má záporný potenciál, který brání elektronům v průchodu – odpuzuje je. Mřížka V_d má proměnlivý potenciál kladný, takové velikosti, kterou překonají jen ionty s dostatečnou energií, jež chceme měřit a tak získat energetickou distribuci iontů dopadajících na kolektor.



Obrázek 1-4: Retarding field energy analyzer (RFEA).

2 Cíle práce

Diagnostika nízkoteplotních technologických systémů pracujících za nízkého tlaku a systémů určených pro depozice funkčních tenkých vrstev je zásadní součástí výzkumu nových přístupů k přípravě materiálů ve formě tenkých vrstev. Poznatky získané studiem vlastností a parametrů výboje umožňují aktivně zasahovat do depozičního procesu tak, aby bylo možné optimalizovat nanášení požadovaných tenkých vrstev na přesně definované substráty. Jednou ze základních metod diagnostiky plazmatu je Langmuirova sonda. Protože moderní depoziční systémy používají k buzení výboje převážně pulzního spínání katodového napětí, je nutné při diagnostice výboje a analýze dat přihlédnout k nutnosti použití měření s časovým rozlišením.

Předkládaná bakalářská práce si proto klade níže uvedené cíle:

- Seznámit se s principy měření pomocí Langmuirovy sondy.
- Seznámit se a naučit se pracovat se softwarem na vyhodnocování sondových charakteristik.
- Z důvodu zastaralosti v současné době používaného vyhodnocovacího software navrhnout metodiku pro „user-friendly“ ovládání softwaru.
- Provést praktickou realizaci GUI pro MS Windows XP.
- Provést analýzu měřených sondových charakteristik pomocí vyvinuté GUI nadstavby a ověřit tak její správnou funkci.
- Získané parametry plazmatu jako je např. teplota elektronů nebo hustota plazmatu uvést do souvislosti s vlastnostmi diagnostikovaného výboje a pokusit se navrhnout vhodné depoziční podmínky v konkrétním reaktoru.

3 Získání dat

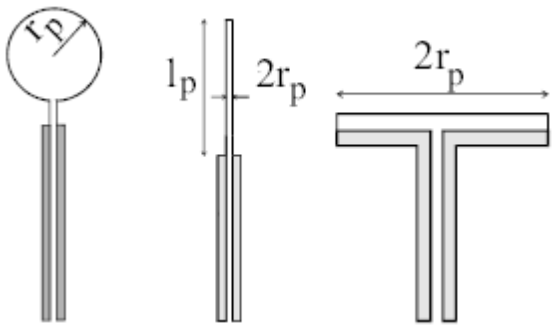
3.1 Langmuirova sonda

3.1.1 Tvar sondy a sondové charakteristiky

Metoda měření Langmuirovou sondou je založena na určení volt-ampérové charakteristiky – dále sondové charakteristiky – obvodu složeného ze dvou kovových elektrod vložených do zkoumaného plazmatu. Při tomto měření rozlišujeme dva způsoby:

- *metoda jedné sondy* – velikost plochy obou elektrod vystavených plazmatu se od sebe liší o několik řádů
- *metoda dvojité sondy* – velikost plochy obou elektrod vystavených plazmatu je velmi malá v porovnání s nádobou obsahují plazma a stejně velká u obou elektrod

Sonda má ve většině případů jednoduchý geometrický tvar – kulová sonda, válcová sonda, rovinná sonda (viz Obrázek 3-1). Při konstrukci sondy musíme vzít v úvahu nejen aktivní kovovou část (aby byla aktivní plocha sondy malá ve srovnání s nádobou obsahující plazma), ale aby i izolované části sondy splnily stejnou podmínku, neboť právě tyto části často podstatně ovlivňují plazma v okolí sondy.



Obrázek 3-1: Typické tvary Langmuirovo sondy. Převzato z [7].

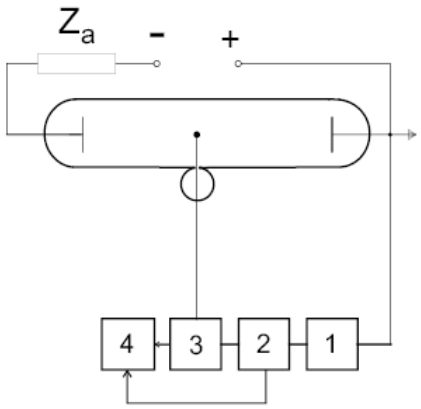
Zařízení na měření sondové charakteristiky principiálně vypadá následovně (viz Obrázek 3-2). Kromě zdroje vysokého stejnosměrného napětí a stabilizačního rezistoru Z_a obsahuje sondový obvod tyto prvky:

1 – stejnosměrný zdroj předpětí sondy

2 – generátor sondového napětí pilového nebo schodového průběhu U_p

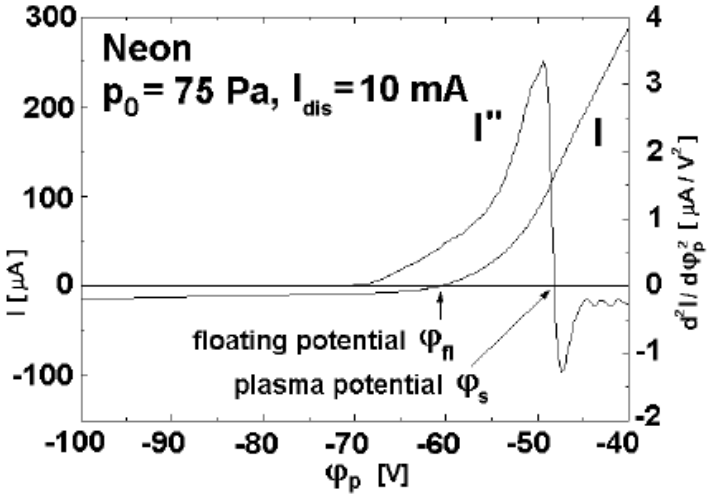
3 – převodník proud-napětí

4 – sběr dat I_p a U_p (počítač)



Obrázek 3-2: Typický sondový obvod. Převzato z [7]. 1 – stejnosměrný zdroj předpětí sondy; 2 – generátor sondového napětí pilového nebo schodového průběhu U_p; 3 – převodník proud-napětí; 4 – sběr dat I_p a U_p (počítač)

Kolem sondy s napětím $\boldsymbol{U_p}$ umístěné v plazmatu vzniká vrstva prostorového náboje - Debyeova vrstva $\boldsymbol{\lambda_D}$, která je úměrná velikosti napětí sondy a potenciálu plazmatu. Toto pole jeden druh nabitých částic urychluje. Nabité částice s opačnou polaritou jsou odpuzovány. Urychlené částice následně dopadají na sondu a tím vzniká sondový proud. V případě, že sondové napětí $\boldsymbol{U_p}$ je rovno potenciálu plazmatu $\boldsymbol{\varphi_s}$, není okolo sondy vrstva prostorového náboje a sonda nabité částice neodpuzuje ani nepřitahuje. Sondová charakteristika je sestavením všech naměřených dvojic napětí sondy $\boldsymbol{U_p}$ a sondového proudu $\boldsymbol{I_p}$ (viz Obrázek 3-3).



Obrázek 3-3: Typická sondová charakteristika a její druhá derivace podle φ_p; φ_p – napětí sondy, I – sondový proud, φ_{fl} – plovoucí potenciál, φ_s – potenciál plazmatu; převzato z [7].

Sondovou charakteristiku rozdělujeme na 3 oblasti:

I. $U_p \leq 2\,U_{fl}$ $\rightarrow \left|\frac{I_{pi}}{I_{pe}}\right| \gg 1$ oblast urychlování kladných iontů

II. $2\,U_{fl} < U_p < 0$ $\rightarrow \left|\frac{I_{pi}}{I_{pe}}\right| \approx 1$ přechodová oblast

III. $0 \leq U_p$ $\rightarrow \left|\frac{I_{pi}}{I_{pe}}\right| \ll 1$ oblast urychlování elektronů

Oblast urychlování kladných iontů je též někdy nazývána oblastí iontové saturace. V této oblasti jsou urychlovány kladné ionty a sami tvoří téměř celý sondový proud. V přechodové oblasti je sondový proud tvořen jak kladnými ionty, tak elektrony. Pouze na plovoucím potenciálu se proud elektronů a proud kladných iontů navzájem kompenzují a celkový sondový proud je roven 0. V oblasti urychlování elektronů je proud tvořen elektrony, které jsou přitahovány kladným napětím na sondě.

3.1.2 Pracovní režimy Langmuirovy sondy

Následující část se omezuje na prezentaci teoretických základů teorie klasické bezesrážkové jednoduché Langmuirovo sondy.

Přídavné jméno bezesrážkový přestavuje Langmuirův předpoklad, že střední volná dráha nabitých částic $\boldsymbol{\lambda_v}$ je mnohem větší než charakteristický rozměr sondy $\boldsymbol{r_p}$: $\lambda_v \gg r_p$. Na základě Debyeovo délky $\boldsymbol{\lambda_D}$ a tohoto předpokladu lze rozlišit 3 pracovní režimy sondy:

1. $\lambda_v \gg r_p \gg \lambda_D$ bezesrážkový pohyb nosičů náboje v tenké vrstvě
2. $\lambda_v \gg \lambda_D \gg r_p$ bezesrážkový pohyb nosičů náboje v tlusté vrstvě
3. $\lambda_D \gg \lambda_v \gg r_p$ srážkový model nosičů náboje

Režim 1: „space charge limit“ – sondový proud je dán především prostorovým nábojem kolem sondy; sonda v tomto režimu ovlivňuje okolní plazma více než ve druhém případě

Režim 2: „orbital motion limit“ – částice uvnitř vrstvy jsou ovlivněny centrální silou a jejich pohyb se podobá orbitálnímu

Obrázek 3-4: Space charge limit a orbital motion limit. Převzato z [9].

Sondový proud $\boldsymbol{I_{pv}}$ pro částici v přitahovanou sondou je

$$I_{pv} = \frac{A_p q_v n_v}{4} \left(\frac{8k_B T_v}{\pi m_v}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{q_v U_p}{k_B T_v}\right)$$

kde $\boldsymbol{A_p}$ je plocha povrchu sondy, $\boldsymbol{q_v}$ je náboj částice v, $\boldsymbol{n_v}$ je koncentrace částice v, $\boldsymbol{T_v}$ je teplota částice v, $\boldsymbol{U_p}$ je sondové napětí. Tento vztah platí jak pro kruhovou sondu, tak pro válcovou sondu i pro rovinnou sondu.

Sondový proud $\boldsymbol{I_{pv}}$ pro částici v odpuzovanou sondou je

$$I_{pv} = \frac{A_p q_v n_v}{4} \left(\frac{8k_B T_v}{\pi m_v}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{q_v U_p}{k_B T_v}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Teplota částic v je

$$T_v = -\frac{q_v}{k_B} \frac{d}{dU_p} \ln\left(\frac{I_{pv}}{I_{pv0}}\right)$$

3.1.3 Výhody a nevýhody sondové diagnostiky

Nejvýznamnější výhody sondové diagnostiky v porovnání s ostatními technikami lze spatřit v následujících atributech:

- technická složitost implementace sondové metody je srovnatelně nižší; rovněž potřebné zařízení pro sondová měření je srovnatelně jednodušší
- z naměřených sondových dat je možné určit časové a prostorové rozložení velkého množství veličin charakterizujících zkoumané plazma (např. n_e, n_i, T_e, U_{pl} a dalších) Prostorové rozlišení je v řádech Debyeovo délky λ_D. Časové rozlišení může být určeno z plazmové frekvence ω_p.

Nevýhody sondové diagnostiky jsou:

- metoda zpracování naměřených dat, za účelem zjištění parametrů plazmatu, je závislá na měřených parametrech
- plazma v okolí sondy je ovlivňováno proudem nabitých částic proudících do sondy
- přítomnost sondy v plazmatu může způsobit nehomogenity v plazmatu
- aplikace sondové metody v plazmatu obsahujícím oscilace, fluktuace a vlny je obtížná, skoro až nemožná
- je velmi obtížné posoudit účinek sekundárních a fotoemisních elektronů z povrchu sondy, stejně jako účinek odražení nosičů náboje od povrchu sondy
- těžké částice mohou během měření vytvořit nebo zničit tenký film na povrchu sondy, který ovlivní vlastnosti povrchu sondy a tím i zcela znemožnit interpretaci naměřených dat

3.1.4 Metoda dvojité sondy

Pokud je mezi dvěma malými elektrodami umístěnými v plazmatu napětí, prochází jimi proud. Výsledná voltampérová charakteristika se pro obě polarity aplikovaného napětí podobá části iontového proudu voltampérové charakteristiky u jednoduché sondy (viz Obrázek 3-5).

Výhodou této metody je, že nepotřebuje velkou referenční elektrodu a proto může být použita i v bezelektrodovém plazmatu (rf generované plazma). Touto metodou se obvykle měří intenzita elektrického pole v plazmatu, ale může být rovněž použita k určení teploty elektronů a za určitých podmínek i k určení hustoty plazmatu. Obvyklé uspořádání metody

dvojité sondy umisťuje sondy blízko k sobě, takže je možné předpokládat, že parametry plazmatu jsou v bodech umístění sond stejné. Teplotu elektronů lze určit podle následujícího výrazu[7]:

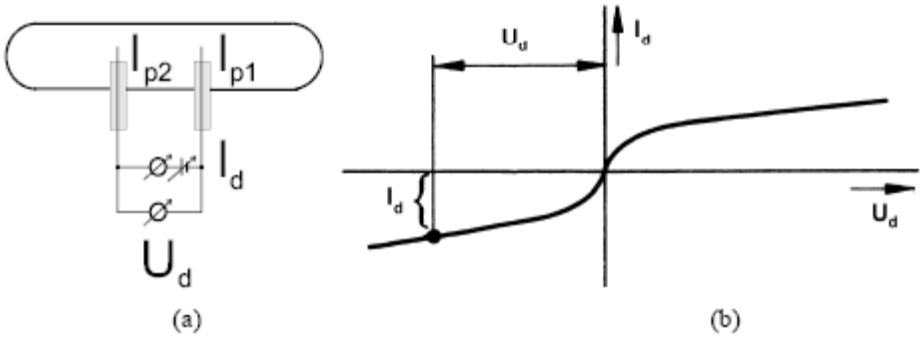
$$\frac{k_B T_e}{q_0} = \left[2\left(\frac{dI_D}{dU_d}\right)_{fl} - \frac{1}{2}\left(\frac{dI_{pi1}}{dU} + \frac{dI_{pi2}}{dU}\right)_{fl}\right]^{-1} \times \frac{2\left(I_{pi1}\right)_{fl}\left(I_{pi2}\right)_{fl}}{\left(I_{pi1}\right)_{fl} + \left(I_{pi2}\right)_{fl}}$$

Kde $\left(\boldsymbol{I_{pi1,2}}\right)_{\boldsymbol{fl}}$ označuje závislost iontového proudu při $U_d = 0$.

Teplotu elektronů lze též určit podle křivky závislosti $\ln(\Gamma)$, tzv. Γ funkce $\Gamma = I_{e1}/I_{e2}$, na $\boldsymbol{U_d}$.

$$\ln\left(\frac{I_{e1}}{I_{e2}}\right) = -\frac{q_0 U_d}{k_B T_e} + \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$$

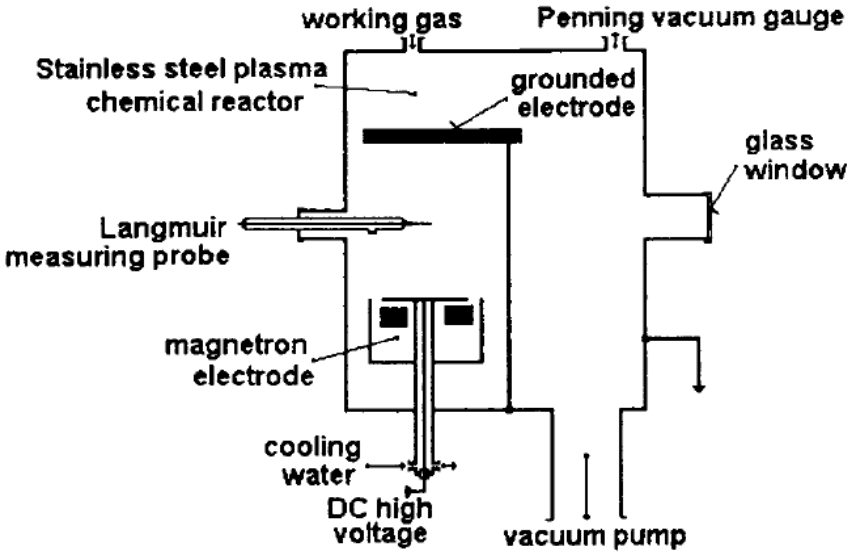
Kde $\boldsymbol{A_1, A_2}$ jsou povrchy obou sond vystavené plazmatu.



Obrázek 3-5: a) základní obvod dvojité sondy; b) typická charakteristika dvojité sondy; převzato z [7]

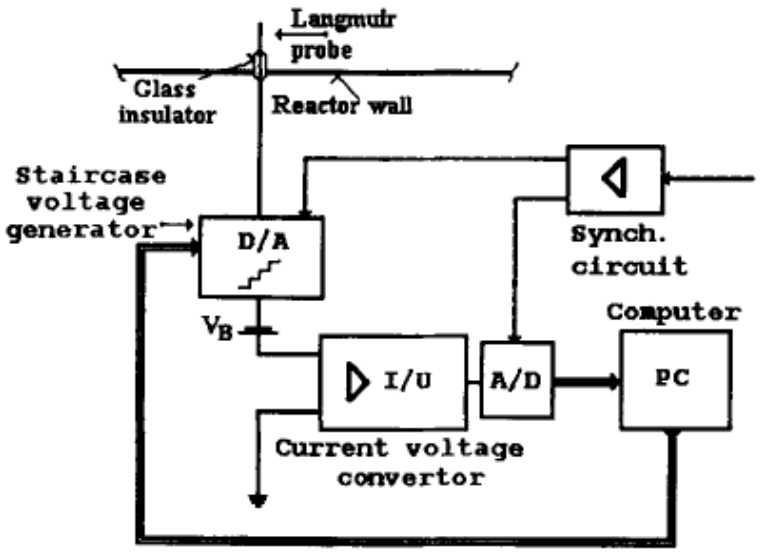
3.2 Měřící aparatura

Za účelem diagnostiky generovaného nízkotlakého plazmatu byla do reaktoru (viz Obrázek 3-6) vložena válcová Langmuirova sonda těchto parametrů: materiál-platina, průměr 0,1 mm a délka 3,4 mm. Sonda byla umístěna 7 cm od titanového terče a rovnoběžně s plochou terče.



Obrázek 3-6: Nákres reaktoru. Upraveno z [11].

Sondové měření bylo provedeno pomocí speciálního elektronického měřícího zařízení (viz Obrázek 3-7), které obsahuje počítačem řízený D/A převodník, jako zdroj sondového napětí schodového průběhu. Po každém kroku změny sondového napětí je provedeno měření sondového proudu pomocí převodníku proud-napětí. Výstup převodníku proud-napětí je připojen na vysokorychlostní A/D převodník (čas převodu analogové hodnoty na digitální je přibližně 1 μs). Celé měření bylo provedeno metodou časového rozlišení, tj. každý bod sondové charakteristiky byl změřen v přesně definovaném okamžiku od začátku pulzu. Naměřená data z A/D převodníku byla odeslána do počítače pro pozdější zpracování ve vyhodnocovacím programu (viz 4.3).



Obrázek 3-7: Schéma obvodu měřící aparatury. Převzato z [11]

4 Vyhodnocování získaných dat

4.1 Program pro vyhodnocování dat „START.EXE“

Pro vyhodnocování dat byl použit program „START.EXE“. Je to program pro vyhodnocování dat získaných jednoduchou Langmuirovou sondou. Autorem tohoto programu je Pavel Kudrna z Katedry elektroniky a vakuové fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.

4.1.1 O programu

První verze programu byla vydána v roce 1993:
Pavel Kudrna, Diplomová práce, Katedra elektroniky a vakuové fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, 1993.

Novější verze programu byla oznámena na Symposiu o elementárních procesech a chemických reakcích v nízkoteplotním plazmatu, Stará Lesná (Slovensko), 1994.

Současná verze, včetně standardního rozložení a integračního vyhodnocení byla vypracována v červenci 1995. Poslední změny byly provedeny v roce 1997.

4.1.2 Funkce programu

Tento program je určen pro zpracování dat získaných z měření pomocí jednoduché válcové Langmuirovy sondy v jednosložkovém plazmatu bez přítomnosti magnetického pole nebo s jeho malým vlivem (neboť tento vliv není programem započítáván).

Vstupem pro program je ASCII soubor s naměřenými sondovými daty v jednoduchém formátu (viz Obrázek 4-1). V prvním sloupci je sondové napětí ve voltech a ve sloupci druhém je sondový proud v ampérech.

-0.800	-0.0000218
-0.700	-0.0000214
-0.600	-0.0000203
-0.500	-0.0000200
-0.400	-0.0000205
-0.300	-0.0000202
-0.200	-0.0000189
-0.100	-0.0000177
0.000	-0.0000124
0.100	-0.0000090
0.200	-0.0000047
0.300	-0.0000006
0.400	0.0000012
0.500	0.0000101
0.600	0.0001047
0.700	0.0007761
0.800	0.0022576
0.900	0.0030959

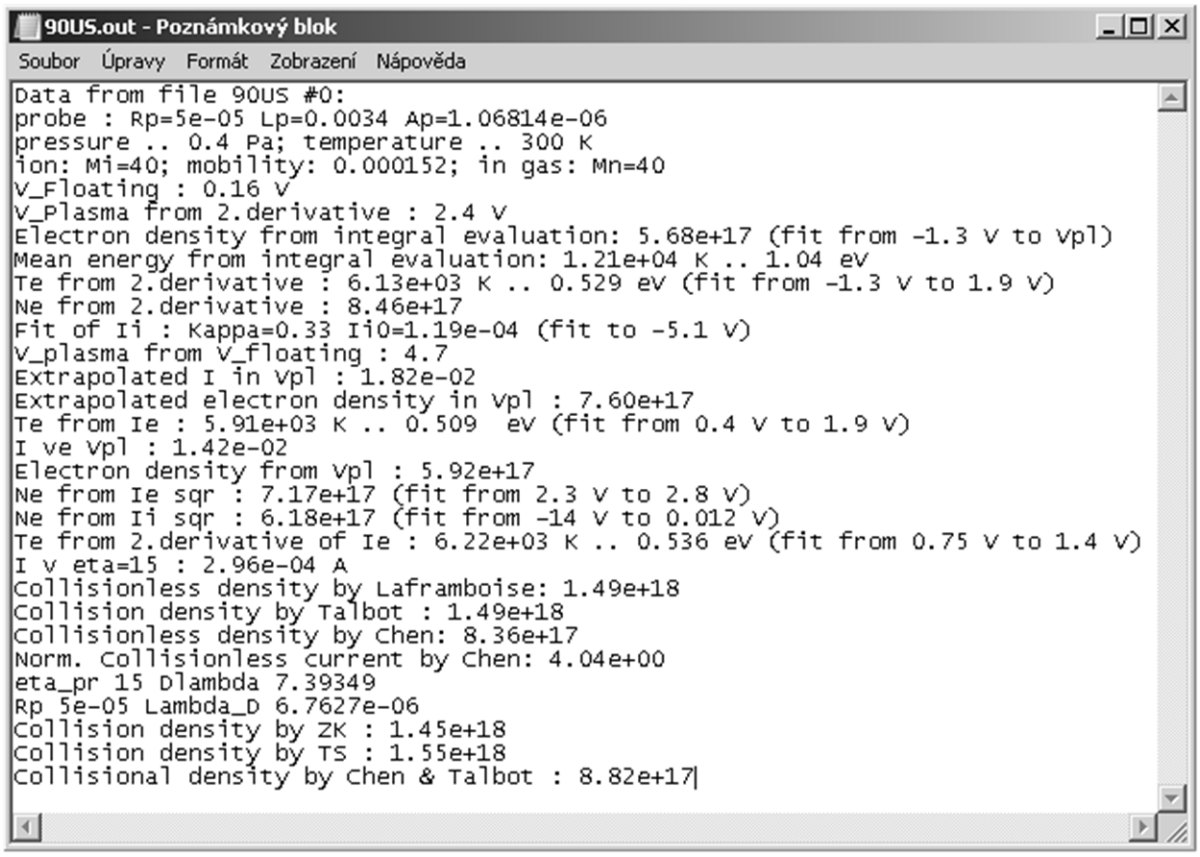
Obrázek 4-1: Náhled části souboru s naměřenými daty (tlak 2 Pa, čas 1000 μs). V této části souboru je vidět plovoucí potenciál plazmatu U_{fl} = 0,33 V.

Program určuje z naměřené sondové charakteristiky plovoucí potenciál plazmatu a vypočítává druhou derivaci sondové charakteristiky. Potenciál plazmatu je určen z průchodu nulou druhé derivace sondové charakteristiky. Je rovněž vypočítán z pozice plovoucího potenciálu, ovšem za předpokladu Maxwellovského rozložení energie elektronů (EEDF). Hlavní parametry plazmatu (teplota elektronů a koncentrace elektronů a iontů) jsou rovněž počítány s předpokladem Maxwellovského rozložení energie elektronů. Teplota elektronů je určena ze sklonu druhé derivace celkového sondového proudu, z elektronové části a ze sklonu druhé derivace elektronového sondového proudu. Koncentrace elektronů je počítána z naměřené hodnoty elektronového proudu při potenciálu plazmatu, z extrapolované hodnoty elektronového proudu při potenciálu plazmatu a z OML modelu v režimu urychlování elektronů (tzv. graf Ie2 vs Vp). Koncentrace iontů je počítána z OML modelu (tzv. graf Ii2 vs Vp), z modelu Allen, Boyd, Reynolds, Chen (tzv. radial motion theory), z modelu Laframboise a využitím několika modelů sběru kladných iontů, které berou v úvahu srážky iontů ve vrstvě prostorového náboje sondy.

Současná verze programu umožňuje vypočítat koncentraci elektronů a elektronovou distribuční funkci za předpokladu libovolné elektronové distribuční funkce. Tohoto je dosaženo buď integrací reálných dat druhé derivace sondové charakteristiky, nebo je druhá derivace aproximována podle distribučního modelu a pak integrována pro získání koncentrace elektronů. V relevantních případech lze druhou derivaci aproximovat podle tzv. standardní distribuce (distribuce typu $f^*(\varepsilon)=\text{const.}\ \varepsilon 1/2.\exp(-\varepsilon\kappa/(\kappa.\varepsilon p\kappa))$, κ je reálný exponent, $\kappa \geq 1$, εp je nejpravděpodobnější elektronová energie; pro $\kappa=1$ dostaneme

Maxwellovskou distribuci, pro κ=2 Druyvesteynovu distribuci, pro κ=4 Davydovovu distribuci atd.; v podstatě lze uvažovat o jakémkoliv reálném κ. Program také počítá podmínky pro použití průchodu nulou u druhé derivace jako určení potenciálu plazmatu (z pohledu srážek elektronů ve vrstvě prostorového náboje sondy; model Klagge a Tichý). Snížení elektronového proudu při potenciálu plazmatu vlivem srážek elektronů v poli prostorového náboje sondy podle Talbota a Choua je rovněž počítáno.

Výstupní data jsou uložena jednak v souboru, který obsahuje nekomentovanou tabulku, ale také v komentovaném souboru, kde je u každé hodnoty název odpovídající veličiny (viz Obrázek 4-2).



Obrázek 4-2: Komentovaný výstupní soubor (tlak 0,4 Pa, čas 90 μs)

4.2 Rozšíření programu „START.EXE“

Důvodem pro rozšíření programu novým grafickým uživatelským rozhraním (dále GUI) byla jeho zastaralost, ale hlavně způsob nastavování všech parametrů, který není uživatelsky přátelský. Během vyhodnocování se rovněž celkem často stávalo, že program byl ukončen s chybovým hlášením. Poté se vyhodnocovaný datový soubor musel vyhodnocovat znovu s opětovným nastavováním všech parametrů.

GUI se skládá ze dvou spustitelných programů:

- *„gui.exe“ – je grafické uživatelské rozhraní*
- *„automatizator.exe“ – je rozhraní mezi „gui.exe“ a programem „START.EXE“*

Názvy a seskupení ovládacích prvků odpovídají jejich umístění ve vyhodnocovacím programu „START.EXE“.

4.2.1 O GUI

Jedna část GUI – soubor „gui.exe“ je naprogramován v jazyku Microsoft Visual Basic 6 s použitím „Microsoft Common Dialog Control 6.0“ (comdlg32.ocx). Zdrojový kód je příloha 1.

Druhá část GUI – soubor „automatizator.exe“ je napsána ve skriptovacím jazyku „AutoIt v3“ od Jonathana Bennetta (http://www.autoitscript.com/site/autoit/). Zdrojový kód je příloha 2.

4.2.2 Funkce GUI

Funkce GUI je založena na přenosu všech zvolených parametrů přes příkazovou řádku do programu „automatizator.exe“, kde dojde k jejich vyhodnocení a provedení zvolených nastavení v programu „START.EXE“.

4.2.3 Instalace GUI

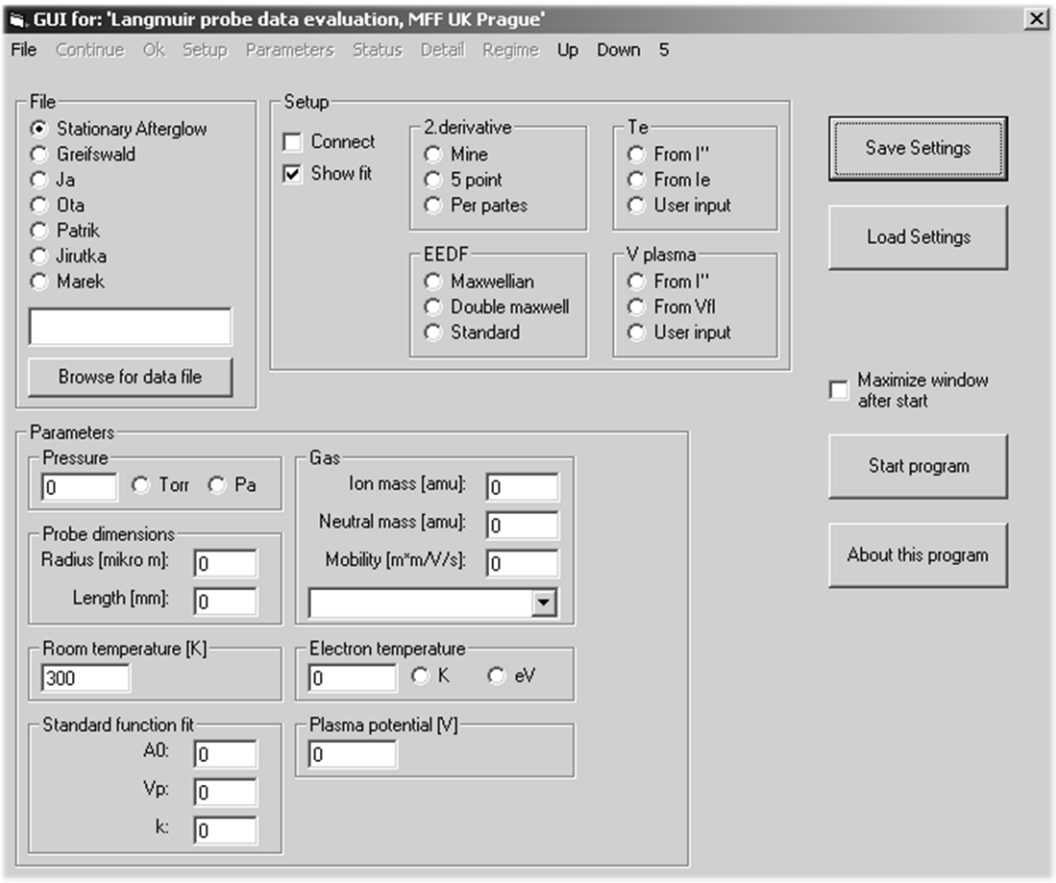
GUI není nutné instalovat. Nicméně pokud má být GUI použit, je nutné mít oba výše zmíněné soubory ve stejném umístění, kde se nachází soubor „START.EXE“.

4.2.4 Použití GUI

Jak již bylo zmíněno v předchozím oddíle, je nutné mít oba soubory, ze kterých se GUI skládá, ve stejném umístění se souborem „START.EXE“. Pokud tato podmínka není

splněna, neumožní GUI spuštění vyhodnocovacího programu se zvoleným nastavením (to je uživateli oznámeno již při spuštění GUI), ale jinak bude GUI plně funkční, tzn. lze všechny parametry nastavovat dle potřeby, ukládat a otevírat již uložená nastavení.

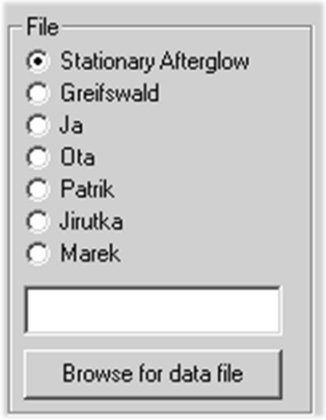
Po spuštění je GUI nastaven podle základního nastavení programu „START.EXE“ (viz Obrázek 4-3), tzn. je nastavena teplota plynu ve výboji 300 °K („Room temperature“), zaškrtnuté políčko „Show fit“, vybrán typ zdrojového souboru „Stationary Afterglow“ a nastavena hodnota „5“ pro vyhlazení derivované funkce (poslední položka na řádku menu).



Obrázek 4-3: Základní nastavení GUI

4.2.4.1 Skupina prvků „File“

Ve skupině „File“ je nutné vybrat typ formátování zdrojového souboru dat. Tlačítkem **„Browse for data file“** se otevře dialogové okno pro vyhledání souboru dat. Pokud má uživatel již cestu ke zdrojovému souboru zkopírovanou ve schránce, může ji rovnou vložit do textového pole nad tímto tlačítkem, existence zdrojového souboru bude ověřena při stisknutí tlačítka **„Start program“** – když soubor nebude nalezen, bude to uživateli oznámeno a nedojde ke spuštění vyhodnocovacího programu.



Obrázek 4-4: Skupina prvků „File“

4.2.4.2 Skupina prvků „Setup“

Zaškrtávací políčko **„Connect“** určuje, zda mají být body v grafu spojeny.

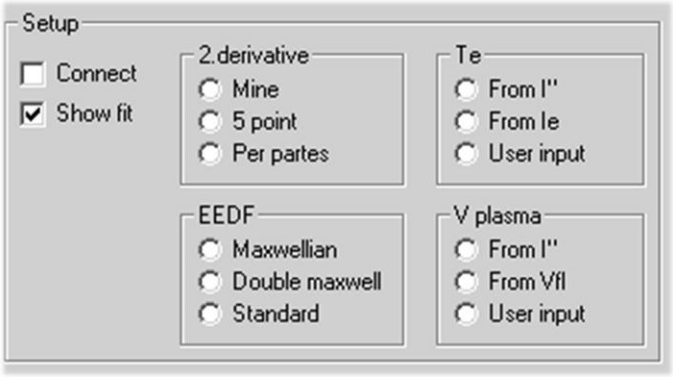
Zaškrtávací políčko **„Show fit“** určuje, zda se má po vybrání intervalů tento interval proložit přímkou.

Podskupina **„2.derivative“** stanoví způsob určení 2. derivace sondového proudu.

Podskupina **„EEDF“** určuje rozdělovací funkci elektronů.

Podskupina **„Te“** stanoví způsob určení teploty elektronů.

Podskupina **„V plasma“** stanoví způsob určení potenciálu plazmatu.



Obrázek 4-5: Skupina prvků „Setup“

4.2.4.3 Skupina prvků „Parameters“

Podskupina **„Pressure“** obsahuje hodnotu tlaku a odpovídající jednotky.

Podskupina **„Probe dimensions“** obsahuje rozměry sondy: poloměr v μm („Radius“) a délku sondy v mm („Length“).

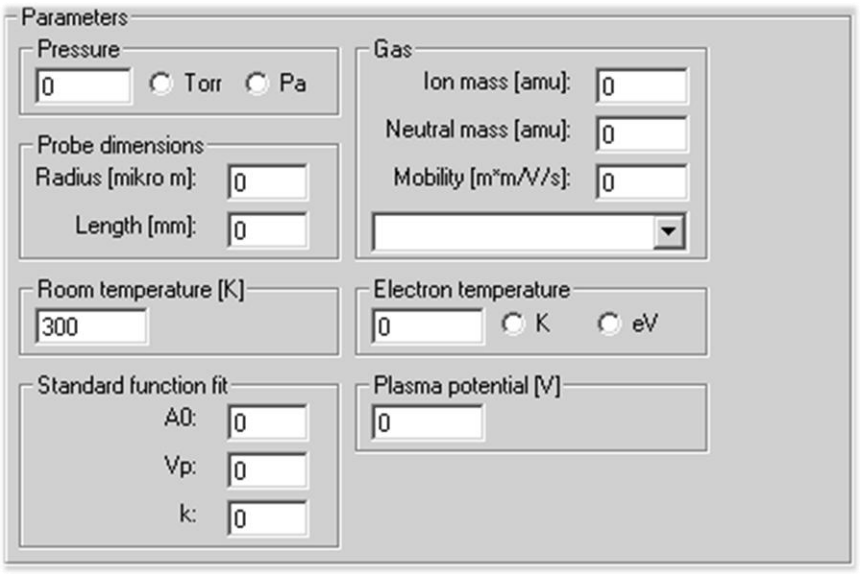
Podskupina **„Room temperature“** obsahuje hodnotu teploty neutrálního plynu ve stupních Kelvina.

Podskupina **„Standard function fit“** obsahuje hodnoty důležité pro volbu „Setup“ – „EEDF“ – „Standard“.

Podskupina **„Gas“** obsahuje hodnoty pro parametry plynu (hmotnost iontů, hmotnost neutrálních atomů a jejich pohyblivost) a jeden rozbalovací seznam. Tento seznam obsahuje plyny, které jsou v souboru „TABULKA.GAS“ (jenž je součástí programu „START.EXE“), z nichž je možné parametry nastavit podle zvoleného plynu.

Podskupina **„Electron temperature“** obsahuje hodnotu teploty elektronů a odpovídající jednotky.

Podskupina **„Plasma potential“** obsahuje hodnotu potenciálu plazmatu v jednotkách Volt.

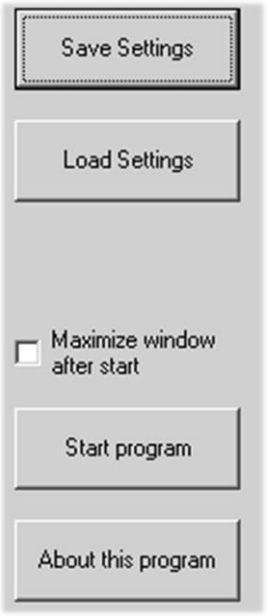


Obrázek 4-6: Skupina prvků „Parameters“

4.2.4.4 Skupina ostatních ovládacích prvků

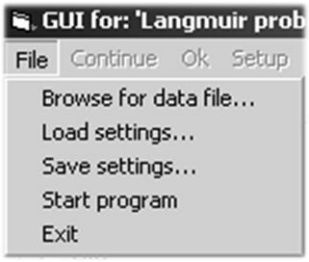
Do této skupiny patří:

- zaškrtávací políčko **„Maximize window after start“**, které určuje, zda má být okno vyhodnocovacího programu po spuštění maximalizováno
- tlačítko **„Save Settings“,** které otevře dialog pro uložení souboru s nastavením
- tlačítko **„Load Settings“**, které otevře dialog pro otevření souboru s nastavením
- tlačítko **„Start program“**, které spustí vyhodnocovací program s nastavením všech určených parametrů
- tlačítko **„About this program“** zobrazí informace o programu
- položka v menu **„Up“** – zvýší hodnotu o 1
- položka v menu **„Down“** – sníží hodnotu o 1
- položka v menu **„5“** – kliknutím na tuto položku se otevře dialog, kde lze požadovanou hodnotu zadat přímo, bez nutnosti klikání na „Up“ nebo „Down“
- položka v menu „File“ – **„Browse for data file…“** otevře dialogové okno pro vyhledání souboru dat
- položka v menu „File“ – **„Load settings…“** otevře dialog pro otevření souboru s nastavením
- položka v menu „File“ – **„Save settings…“** otevře dialog pro uložení souboru s nastavením
- položka v menu „File“ – **„Start program“** spustí vyhodnocovací program s nastavením všech určených parametrů
- položka v menu „File“ – **„Exit“** ukončí program



Obrázek 4-7: Skupina ostatních prvků

Obrázek 4-8: Skupina ostatních prvků



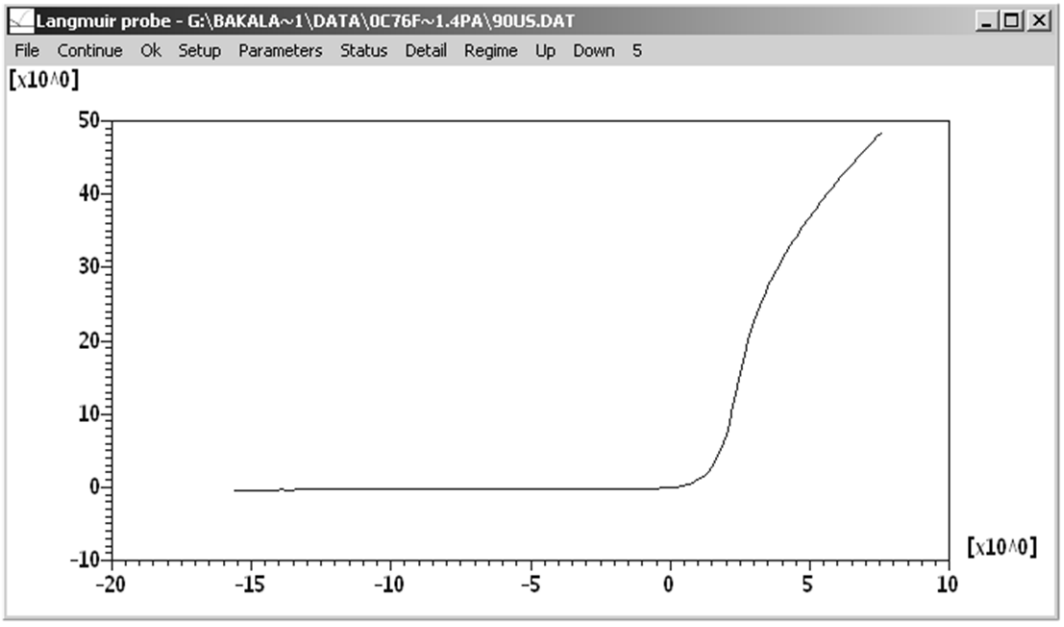
Obrázek 4-9: Skupina ostatních prvků

4.3 Postup vyhodnocování

Před samotným začátkem vyhodnocování bylo nutné vždy nastavit potřebné parametry pro výpočty:

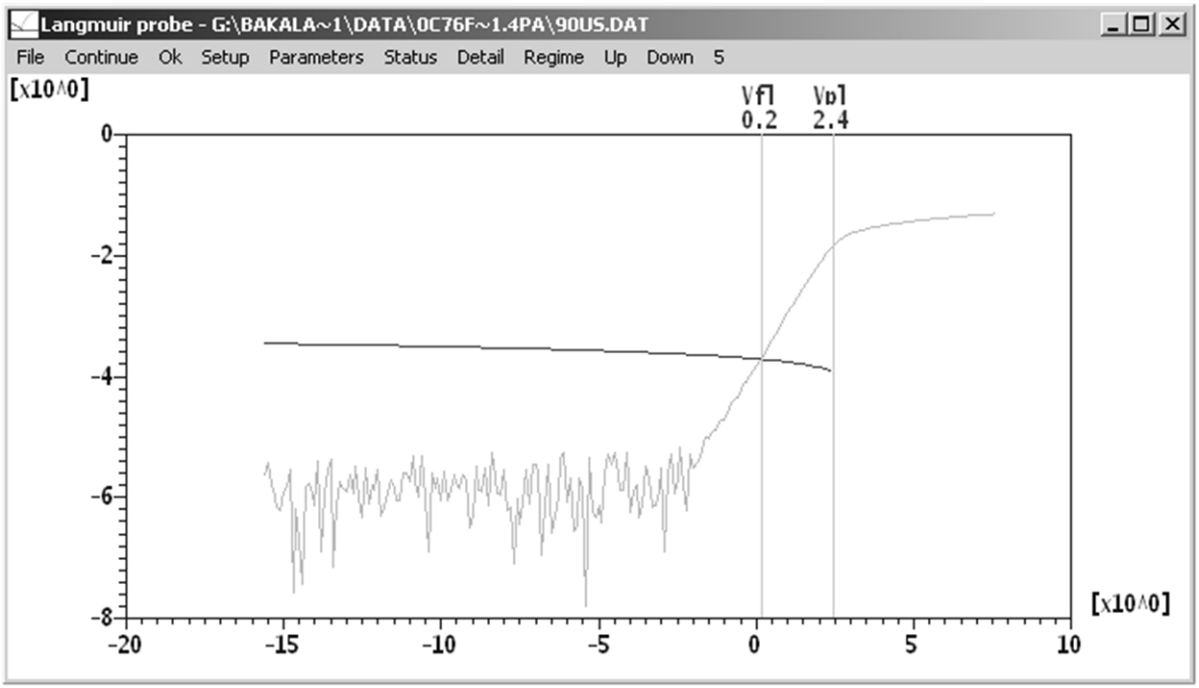
- *formát vstupního souboru – Jirutka*
- *teplota neutrálního plynu – 300 °K*
- *spojit datové body grafu (Connect)*
- *2. derivace – Mine*
- *teplota elektronů – uživatelské zadání*
- *elektronová energetická rozdělovací funkce – Maxwellovská*
- *potenciál plazmatu – z druhé derivace sondového proudu*
- *poloměr sondy – 50 μm*
- *délka sondy – 3,4 mm*
- *hmotnost iontu – 40 amu*
- *hmotnost neutrálu – 40 amu*
- *pohyblivost – 1,52E^{-4}*
- *tlak – 0,4 Pa, 2 Pa, 20 Pa*
- *vyhledat datový soubor*

Po úspěšném nastavení všech potřebných parametrů a otevření datového souboru je zobrazena sondová charakteristika (viz Obrázek 4-10).



Obrázek 4-10: Sondová charakteristika (tlak 0,4 Pa, 90 μs)

Pak následuje jedno kliknutí na „Continue“ a program určí plovoucí potenciál, při dalším kliknutí na „Continue“ program vypočítá druhou derivaci sondového proudu. Po dalším kliknutí na „Continue“ je kurzor umístěn na místě, které program vyhodnotil jako potenciál plazmatu. Toto musíme potvrdit nebo kurzor přesunout na námi určené místo a poté potvrdit. Dalším krokem je určení integračního intervalu pro energii elektronů. Následujícím krokem je určení proložení druhé derivace přímkou pro výpočet teploty elektronů a jejich koncentrace. Poté musíme do programu vložit teplotu elektronů (v našem případě to je teplota efektivní T_{eff}). Pokračujeme vybráním intervalu elektronového proudu. Opět pokračujeme vybráním intervalu elektronového proudu. Pokračujeme vybráním intervalu iontového proudu. Opět vybíráme interval pro proložení přímkou, nyní u druhé derivace sondového proudu. Poslední částí vyhodnocení datového souboru je uložení vypočítaných dat. Výsledné znázornění vyhodnoceného datového souboru viz Obrázek 4-11.



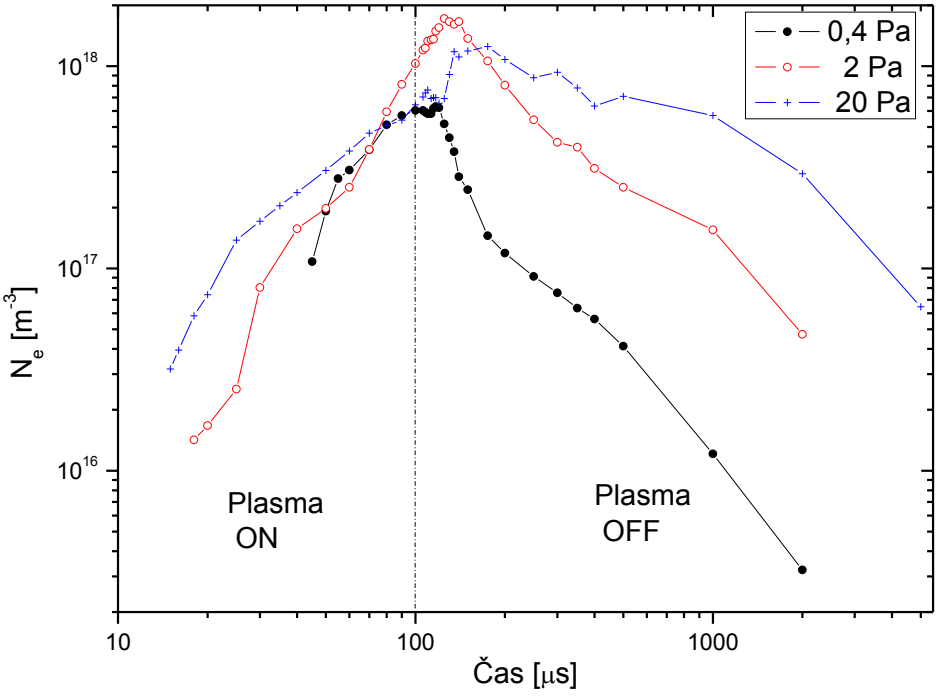
Obrázek 4-11: Vyhodnocený datový soubor (tlak 0,4 Pa, 90 µs)

5 Výsledky a diskuse získaných dat

Měření sondových charakteristik byla prováděna v experimentálním vakuovém zařízení osazeném vyváženým magnetronem průměru 5 cm. Jako pracovní plyn byl použit čistý argon při tlaku 0,4 Pa, 2 Pa a 20 Pa. Katodu tvořil čistý titan. Nízkoteplotní plazma bylo generováno v pulzním režimu. Jinými slovy, zdroj stejnosměrného napětí (U_{max} = 1 kV a I_{max} = 1 A) sloužil k napájení vysokonapěťového proudového spínače založeného na IGBT tranzistorech. Ten byl přes zátěž velikosti 6 Ohmů zapojen přímo na katodu magnetronu. Pracovní režim pulzního plazmatu byl zvolen na hodnoty: opakovací frekvence 100 Hz a délka pracovního pulzu 100 μs. Tedy střída byla 1%. Střední hodnota proudu byla nastavena na 0,5 A, tedy špičková hodnota proudu v pulzu plazmatu dosahovala hodnot 50 A. Za účelem diagnostiky takto generovaného nízkotlakého plazmatu byla do reaktoru vložena válcová Langmuirova sonda těchto parametrů: materiál-platina, průměr 0,1 mm a délka 3,4 mm. Sonda byla umístěna 7 cm od titanového terče a rovnoběžně s plochou terče. Tedy můžeme zanedbat vliv magnetického pole na měřený sondový proud.

Pomocí elektronické aparatury, podrobně popsané v kapitole 0 byla získána časově rozlišená měření sondových charakteristik přes celou periodu buzení výboje. Celkem bylo naměřeno 115 datových souborů. Z toho bylo 35 souborů získáno při tlaku 0,4 Pa a z nich bylo úspěšně vyhodnoceno 29. Při tlaku 2 Pa bylo získáno 39 souborů, z nichž bylo úspěšně vyhodnoceno 32 souborů. Poslední měření probíhala při tlaku 20 Pa, přičemž bylo získáno 41 souborů a úspěšně vyhodnoceno 37 z nich. Neúspěšné vyhodnocení charakteristik spočívalo v nemožnosti získání relevantních parametrů plazmatu díky: I) příliš slabému měřenému signálu (prakticky neměřitelný výboj na hranici rozlišitelnosti), II) nedefinovatelnosti plazmatu v důsledku přechodového jevu typického pro začátek pulzu plazmatu, kdy ještě není vytvořeno dostatečné množství iontů a ve výboji se vyskytují prakticky jen velmi energetické svazky elektronů odražené od katody, nelze tedy hovořit o kvazineutralitě a tedy není možné definovat plazma. Můžeme tedy říci, že změřené sondové charakteristiky v daných časech, které nebylo možno spolehlivě vyhodnotit, lze považovat za měření, kdy nebylo možné plyn v reaktoru považovat v intencích definicí uvedených v kapitole 1 za plazma.

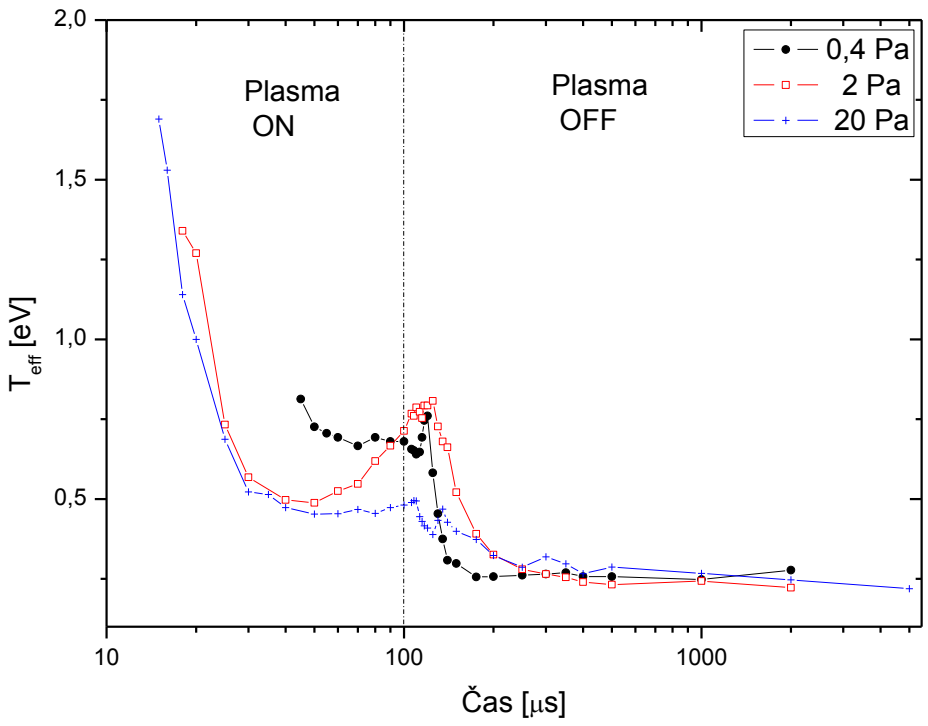
Na obrázku 5-1 je možno vidět časový vývoj koncentrace elektronů N_e v plazmatu pulzně buzeného magnetronového výboje v čistém argonu. Koncentrace elektronů byla stanovena z elektronového proudu na potenciálu plazmatu. Do grafu jsou zaneseny časové charakteristiky pro všechny tři tlaky pracovního plynu v reaktoru. Z grafu je patrné, že pro tlak 0,4 Pa koncentrace elektronů dosahuje svého maxima 17 μs po skončení pulzu. Při tlaku 2 Pa je to 25 μs po skončení pulzu a při tlaku 20 Pa je to 75 μs po skončení pulzu. Při porovnání koncentrací elektronů všech tří tlaků pracovního plynu je zřejmé, že koncentrace elektronů je nejvyšší při tlaku 2 Pa. Po skončení pulzu je možné si rovněž povšimnout, že čím nižší je tlak pracovního plynu, tím více se křivka poklesu koncentrace elektronů přibližuje exponenciále. Při porovnání koncentrace elektronů při tlaku 0,4 Pa a 20 Pa můžeme pozorovat podobné koncentrace elektronů v časovém rozmezí 80 – 120 μs od začátku pulzu, načež se koncentrace rozcházejí – při tlaku 20 Pa roste a při tlaku 0,4 Pa klesá.



Obrázek 5-1: Koncentrace elektronů N_e

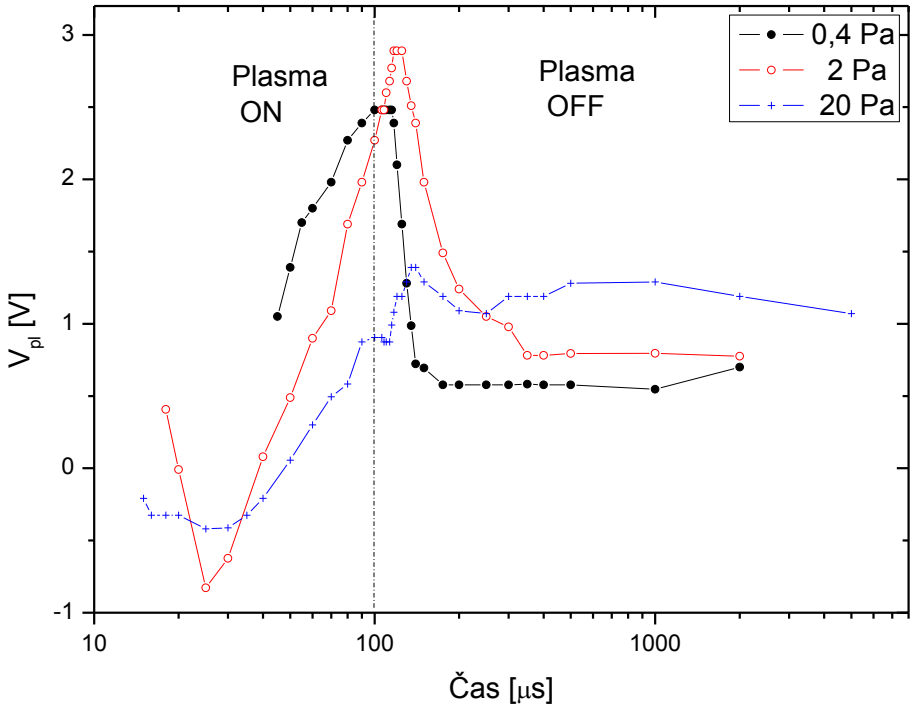
Do grafu na obrázku 5-2 je zanesen časový vývoj elektronové efektivní teploty T_{eff} pro všechny měřené tlaky pracovního plynu v reaktoru. Efektivní elektronová teplota je definována vztahem $T_{eff} = 2/3*E*e^{-1}$, kde E je střední kinetická energie elektronů spočítaná z integrace druhé derivace sondové charakteristiky. V případě, že elektrony lze popsat Maxwellovskou energetickou distribuční funkcí, pak je hodnota T_{eff} přímo rovna hodnotě

elektronové teploty získané jako směrnice interpolované elektronové části sondového proudu v logaritmické škále viz kap. 4.1.2. Změřené hodnoty T_{eff} vykazují exponenciále podobný pokles během pulzu výboje. Tento jev si vysvětlujeme ochlazením elektronového plynu díky masivní ionizaci titanových atomů (ionizační energie Ti je zhruba poloviční oproti Ar). Množství rozprášených titanových částic roste s časem, jak se zvyšuje proud výbojem. Podle očekávání teplota elektronů klesá s rostoucím tlakem. Podobně jako u koncentrace elektronů i u jejich efektivní teploty můžeme pozorovat maxima v rozmezí 20 – 30 μs po skončení pulzu. Maxima efektivní teploty bylo dosaženo po skončení pulzu při tlaku 0,4 a 2 Pa. Tento jev bude pravděpodobně souviset s pozorovaným maximem elektronové hustoty opět během prvních několika desítek mikrosekund po skončení pulzu plazmatu. Můžeme vyslovit hypotézu, že tyto lokální maxima v N_e a T_{eff} můžeme přisoudit nabitým částicím, které přiletí do oblasti ve výboji, kde je umístěna sonda, v čase po skončení pulzu výboje. Ionty a elektrony se mohou díky ambipolární difúzi dostat z oblasti katody do oblasti umístění Langmuirovy sondy. Z toho plyne, že dynamika pulzního výboje hraje důležitou roli při optimalizaci depozičních podmínek. Změna délky pulzu plazmatu, střídy nebo pulzní frekvence pak může zásadním způsobem ovlivnit parametry plazmatu v okolí substrátu.



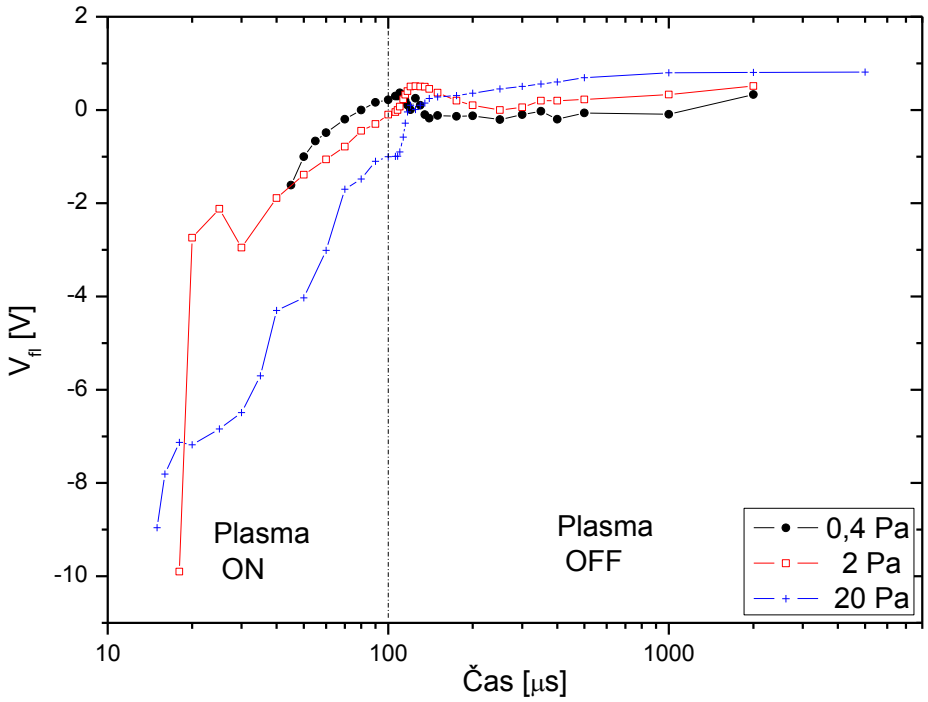
Obrázek 5-2: Elektronová efektivní teplota T_{eff}

Obrázek 5-3 zobrazuje časový vývoj potenciálu plazmatu V_{pl} pro všechny měřené tlaky pracovního plynu v reaktoru. Podobně jako u předchozích diskutovaných parametrů plazmatu, tak i zde můžeme pozorovat během pulzu výboje strmý nárůst potenciálu plazmatu od cca -1 V do cca 3 V s maximem opět v prvních několika mikrosekundách po skončení pulzu výboje. Pokud se bude deponovaná vrstva udržovat na potenciálu země, tak se bude energie iontů bombardujících substrát během pulzu výboje měnit.



Obrázek 5-3: Potenciál plazmatu V_{pl} (space potential)

Obrázek 5-4 zobrazuje časový vývoj plovoucího potenciálu V_{fl} pro všechny měřené tlaky pracovního plynu v reaktoru. Opět během pulzu výboje plovoucí potenciál strmě roste z cca -10 V na zhruba 0 V v době vypnutí pulzu výboje. Na rozdíl od časového vývoje předchozích parametrů výboje, tak zde nepozorujeme ve významné míře lokální maximum V_{fl} v časech po vypnutí pulzu výboje. Z grafu je zřejmé, že izolovaný substrát bude obzvláště během pulzu výboje vystaven bombardování ionty o energiích v řádu 10 eV.



Obrázek 5-4: Plovoucí potenciál V_{fl}

6 Závěr

V průběhu vypracování mojí práce jsem se podrobněji seznámil s metodami diagnostiky plazmatu, především měření pomocí jednoduché Langmuirovy sondy a rovněž jsem si rozšířil obzory ve světě plazmatu kolem nás i průmyslovém využití. Při vyhodnocování datových souborů jsem se seznámil a naučil pracovat s programem na vyhodnocování sondových charakteristik „START.EXE“. Přičemž značná část práce s programem spočívala v nastavování vstupních parametrů. Tato část činnosti s programem byla v průběhu práce eliminována vytvořením funkční nadstavby pro vyhodnocovací program – grafickým uživatelským rozhraním s možností ukládání a načítání nastavených parametrů do/z konfiguračních souborů. Toto uživatelské rozhraní mohlo být celé zpracované pomocí skriptovacího jazyka „AutoIt v3“, neboť tento umožňuje i použití grafických ovládacích prvků, ale já jsem využil své dřívější zkušenosti s programováním v jazyku Microsoft Visual Basic 6 a ovládací část programu vytvořil v něm. Grafické uživatelské rozhraní bylo testováno na počítači s operačním systémem Microsoft Windows XP Professional SP3 a na počítači s operačním systémem Microsoft Windows Vista Home Basic SP1, kde byla ověřena jeho funkčnost.

Vyhodnocené parametry plazmatu získané z dat naměřených v průmyslovém depozičním reaktoru pracujícím s pulzním nízkotlakým magnetronovým výbojem jasně prokázaly komplexní chování parametrů plazmatu během rozvoje pulzu výboje i během dohasínání výboje. Překvapivým výsledkem bylo pozorování lokálního maxima všech parametrů plazmatu (vyjma plovoucího potenciálu) v čase cca 30 μs po skončení pulzu výboje. Tento jev si vysvětluji dynamickým chováním takovéhoto výboje, kdy po vypnutí vysokého napětí na katodě již nabité částice nejsou vázány $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ polem a mohou se difúzí pohybovat směrem k substrátu. Protože hustota plazmy je na konci pulzu vysoká, tak ani po uletění vzdálenosti několika centimetrů se plazma významně nerozpadne. Tak můžeme i v době vypnutí příkonu elektrické energie do výboje pozorovat stále enormní hustotu plazmatu. To pak můžeme označit za unikátní vlastnost pulzních depozičních systémů, která přispívá k přípravě tenkých vrstev odlišných vlastností ve srovnání s konvenčními naprašovacími metodami.

7 Zdroje

1. Richard Fitzpatrick, The Physics of Plasmas, Second Editions, Lulu, August 26, 2008 http://www.lulu.com/product/paperback/the-physics-of-plasmas/3436340; http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/380.pdf
2. Paul M. Bellan, Fundamentals of Plasma Physics, Cambridge University Press, April 6, 2006, ISBN 0-521-82116-9
3. P. Kulhánek, Teorie plazmatu; studijní text pro FJFI ČVUT, 2008 http://www.aldebaran.cz/studium/fpla.pdf
4. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges And Materials Processing, John Wiley & Sons, New York, 1994.
5. Viktor Martišovitš, ZÁKLADY FYZIKY PLAZMY, FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY UNIVERZITA KOMENSKÉHO, Bratislava 2004
6. Kenro Miyamoto, Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion, 2000, http://people.physics.anu.edu.au/~jnh112/AIIM/c17/Miyamoto.pdf
7. S. Pfau, M. Tichý, Langmuir probe diagnostics of low-temperature plasmas, in Low Temperature Plasma Physics, R. Hippler et al. Eds., Wiley-VCH, Berlin, 2001, pp. 131-172.
8. Francis F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion Plasma Physics, Springer, 2nd edition, January 31, 1984, ISBN 978-0306413322
9. P. Kudrna, Disertační práce, MFF UK, 1996.
10. http://www.pma.caltech.edu/Courses/ph136/yr2011/1019.1.K.pdf
11. P. Adámek, J. Kalčík, M. Šícha, M. Tichý, H. Biederman, L. Soukup, L. Jastrabík, Czechoslovak Journal of Physics, 49(12) (1999) 1685-1701.
12. http://www.autoitscript.com/site/autoit/

8 Přílohy

8.1 Příloha 1: Zdrojový kód - soubor "gui.frm":

```
VERSION 5.00
Object = "{F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.2#0"; "comdlg32.ocx"
Begin VB.Form Form1
   BorderStyle     =   0  'None
   Caption         =   "Form1"
   ClientHeight    =   7680
   ClientLeft      =   150
   ClientTop       =   720
   ClientWidth     =   9915
   LinkTopic       =   "Form1"
   MaxButton       =   0   'False
   MinButton       =   0   'False
   ScaleHeight     =   7680
   ScaleWidth      =   9915
   StartUpPosition =   3  'Windows Default
   Begin VB.CheckBox maximize
      Caption         =   "Maximize window after start"
      Height          =   375
      Left            =   7800
      TabIndex        =   66
      Top             =   2880
      Width           =   1695
   End
   Begin VB.CommandButton about
      Caption         =   "About this program"
      Height          =   615
      Left            =   7800
      TabIndex        =   65
      Top             =   4320
      Width           =   1695
   End
   Begin VB.CommandButton BtnStart
      Caption         =   "Start program"
      Height          =   615
      Left            =   7800
      TabIndex        =   2
      Top             =   3480
      Width           =   1695
   End
   Begin VB.Frame param
      Caption         =   "Parameters"
      Height          =   4215
      Left            =   120
      TabIndex        =   49
      Top             =   3360
      Width           =   6375
      Begin VB.Frame gas
         Caption         =   "Gas"
         Height          =   1695
         Left            =   2640
         TabIndex        =   61
         Top             =   240
         Width           =   2655
         Begin VB.ComboBox plyny
            Height          =   315
            ItemData        =   "gui.frx":0000
            Left            =   120
            List            =   "gui.frx":0002
```

```
   TabIndex        =   34
   Top             =   1320
   Visible         =   0   'False
   Width           =   2380
End
Begin VB.TextBox neutral
   BeginProperty DataFormat
      Type            =   1
      Format          =   "0"
      HaveTrueFalseNull=   0
      FirstDayOfWeek  =   0
      FirstWeekOfYear =   0
      LCID            =   1029
      SubFormatType   =   1
   EndProperty
   Height          =   285
   Left            =   1800
   TabIndex        =   32
   Text            =   "0"
   Top             =   600
   Width           =   700
End
Begin VB.TextBox ion
   BeginProperty DataFormat
      Type            =   1
      Format          =   "0"
      HaveTrueFalseNull=   0
      FirstDayOfWeek  =   0
      FirstWeekOfYear =   0
      LCID            =   1029
      SubFormatType   =   1
   EndProperty
   Height          =   285
   Left            =   1800
   TabIndex        =   31
   Text            =   "0"
   Top             =   240
   Width           =   700
End
Begin VB.TextBox mobility
   BeginProperty DataFormat
      Type            =   1
      Format          =   "0,0000E+00"
      HaveTrueFalseNull=   0
      FirstDayOfWeek  =   0
      FirstWeekOfYear =   0
      LCID            =   1029
      SubFormatType   =   6
   EndProperty
   Height          =   285
   Left            =   1800
   TabIndex        =   33
   Text            =   "0"
   Top             =   960
   Width           =   700
End
Begin VB.Label Label8
   Alignment       =   1  'Right Justify
   Caption         =   "Neutral mass [amu]:"
   Height          =   255
   Left            =   120
   TabIndex        =   64
   Top             =   600
   Width           =   1500
```

```
   End
   Begin VB.Label Label7
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "Ion mass [amu]:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   63
      Top             =   240
      Width           =   1500
   End
   Begin VB.Label Label6
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "Mobility [m*m/V/s]:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   62
      Top             =   960
      Width           =   1500
   End
End
Begin VB.Frame Frame5
   Caption         =   "Standard function fit"
   Height          =   1335
   Left            =   120
   TabIndex        =   57
   Top             =   2760
   Width           =   2415
   Begin VB.TextBox sffK
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   1560
      TabIndex        =   41
      Text            =   "0"
      Top             =   960
      Width           =   615
   End
   Begin VB.TextBox sffA0
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   1560
      TabIndex        =   39
      Text            =   "0"
      Top             =   240
      Width           =   615
   End
   Begin VB.TextBox sffVp
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
```

```
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   1560
      TabIndex        =   40
      Text            =   "0"
      Top             =   600
      Width           =   615
   End
   Begin VB.Label Label5
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "k:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   60
      Top             =   960
      Width           =   1215
   End
   Begin VB.Label Label4
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "A0:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   59
      Top             =   240
      Width           =   1215
   End
   Begin VB.Label Label3
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "Vp:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   58
      Top             =   600
      Width           =   1215
   End
End
Begin VB.Frame Frame4
   Caption         =   "Plasma potential [V]"
   Height          =   615
   Left            =   2640
   TabIndex        =   56
   Top             =   2760
   Width           =   2655
   Begin VB.TextBox Vpl
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   120
      TabIndex        =   42
      Text            =   "0"
      Top             =   240
```

```
      Width           =   855
   End
End
Begin VB.Frame Frame3
   Caption         =   "Room temperature [K]"
   Height          =   615
   Left            =   120
   TabIndex        =   55
   Top             =   2040
   Width           =   2415
   Begin VB.TextBox teplotaMistnosti
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   120
      TabIndex        =   35
      Text            =   "300"
      Top             =   240
      Width           =   855
   End
End
Begin VB.Frame pTE
   Caption         =   "Electron temperature"
   Height          =   615
   Left            =   2640
   TabIndex        =   54
   Top             =   2040
   Width           =   2655
   Begin VB.OptionButton TeeV
      Caption         =   "eV"
      Height          =   255
      Left            =   1800
      TabIndex        =   38
      Top             =   240
      Width           =   615
   End
   Begin VB.OptionButton teK
      Caption         =   "K"
      Height          =   255
      Left            =   1080
      TabIndex        =   37
      Top             =   240
      Width           =   615
   End
   Begin VB.TextBox teplota
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   120
      TabIndex        =   36
```

```
      Text            =   "0"
      Top             =   240
      Width           =   855
   End
End
Begin VB.Frame Frame2
   Caption         =   "Probe dimensions"
   Height          =   975
   Left            =   120
   TabIndex        =   51
   Top             =   960
   Width           =   2415
   Begin VB.TextBox probeLength
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   1560
      TabIndex        =   30
      Text            =   "0"
      Top             =   600
      Width           =   615
   End
   Begin VB.TextBox probeRadius
      BeginProperty DataFormat
         Type            =   1
         Format          =   "0,00"
         HaveTrueFalseNull=   0
         FirstDayOfWeek  =   0
         FirstWeekOfYear =   0
         LCID            =   1029
         SubFormatType   =   1
      EndProperty
      Height          =   285
      Left            =   1560
      TabIndex        =   29
      Text            =   "0"
      Top             =   240
      Width           =   615
   End
   Begin VB.Label Label2
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "Length [mm]:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   53
      Top             =   600
      Width           =   1215
   End
   Begin VB.Label Label1
      Alignment       =   1  'Right Justify
      Caption         =   "Radius [mikro m]:"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   52
      Top             =   240
      Width           =   1215
   End
```

```
   End
   Begin VB.Frame Frame1
      Caption         =   "Pressure"
      Height          =   615
      Left            =   120
      TabIndex        =   50
      Top             =   240
      Width           =   2415
      Begin VB.OptionButton prPa
         Caption         =   "Pa"
         Height          =   255
         Left            =   1680
         TabIndex        =   28
         Top             =   240
         Width           =   615
      End
      Begin VB.OptionButton prtorr
         Caption         =   "Torr"
         Height          =   255
         Left            =   960
         TabIndex        =   27
         Top             =   240
         Width           =   615
      End
      Begin VB.TextBox pressure
         BeginProperty DataFormat
            Type            =   1
            Format          =   "0,00"
            HaveTrueFalseNull=   0
            FirstDayOfWeek  =   0
            FirstWeekOfYear =   0
            LCID            =   1029
            SubFormatType   =   1
         EndProperty
         Height          =   285
         Left            =   120
         TabIndex        =   26
         Text            =   "0"
         Top             =   240
         Width           =   735
      End
   End
End
Begin VB.Frame Setup
   Caption         =   "Setup"
   Height          =   2655
   Left            =   2520
   TabIndex        =   44
   Top             =   240
   Width           =   4935
   Begin VB.Frame sTE
      Caption         =   "Te"
      Height          =   1095
      Left            =   3240
      TabIndex        =   48
      Top             =   240
      Width           =   1575
      Begin VB.OptionButton teui
         Caption         =   "User input"
         Height          =   255
         Left            =   120
         TabIndex        =   19
         Top             =   720
         Width           =   1335
```

```
   End
   Begin VB.OptionButton teie
      Caption         =   "From Ie"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   18
      Top             =   480
      Width           =   1335
   End
   Begin VB.OptionButton teid
      Caption         =   "From I"""
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   17
      Top             =   240
      Width           =   1335
   End
End
Begin VB.CheckBox showFit
   Caption         =   "Show fit"
   Height          =   375
   Left            =   120
   TabIndex        =   13
   Top             =   600
   Value           =   1  'Checked
   Width           =   975
End
Begin VB.Frame sVplasma
   Caption         =   "V plasma"
   Height          =   1095
   Left            =   3240
   TabIndex        =   47
   Top             =   1440
   Width           =   1575
   Begin VB.OptionButton vpui
      Caption         =   "User input"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   25
      Top             =   720
      Width           =   1335
   End
   Begin VB.OptionButton vpvfl
      Caption         =   "From Vfl"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   24
      Top             =   480
      Width           =   1335
   End
   Begin VB.OptionButton vplid
      Caption         =   "From I"""
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   23
      Top             =   240
      Width           =   1335
   End
End
Begin VB.Frame Seedf
   Caption         =   "EEDF"
   Height          =   1095
   Left            =   1320
   TabIndex        =   46
```

```
   Top             =   1440
   Width           =   1695
   Begin VB.OptionButton stand
      Caption         =   "Standard"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   22
      Top             =   720
      Width           =   1500
   End
   Begin VB.OptionButton dmax
      Caption         =   "Double maxwell"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   21
      Top             =   480
      Width           =   1500
   End
   Begin VB.OptionButton max
      Caption         =   "Maxwellian"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   20
      Top             =   240
      Width           =   1500
   End
End
Begin VB.Frame derivative
   Caption         =   "2.derivative"
   Height          =   1095
   Left            =   1320
   TabIndex        =   45
   Top             =   240
   Width           =   1695
   Begin VB.OptionButton pont5
      Caption         =   "5 point"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   15
      Top             =   480
      Width           =   1200
   End
   Begin VB.OptionButton perpartes
      Caption         =   "Per partes"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   16
      Top             =   720
      Width           =   1200
   End
   Begin VB.OptionButton mine
      Caption         =   "Mine"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   14
      Top             =   240
      Width           =   1200
   End
End
Begin VB.CheckBox Connect
   Caption         =   "Connect"
   Height          =   255
   Left            =   120
   TabIndex        =   12
```

```
      Top             =   360
      Width           =   1095
   End
End
Begin VB.Frame File
   Caption         =   "File"
   Height          =   3015
   Left            =   120
   TabIndex        =   43
   Top             =   240
   Width           =   2295
   Begin VB.CommandButton browse
      Caption         =   "Browse for data file"
      Height          =   375
      Left            =   120
      TabIndex        =   11
      ToolTipText     =   "Browse for file with data"
      Top             =   2520
      Width           =   1935
   End
   Begin VB.TextBox jmenosouboru
      Height          =   375
      Left            =   120
      TabIndex        =   10
      Top             =   2040
      Width           =   1935
   End
   Begin VB.OptionButton Greifswald
      Caption         =   "Greifswald"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   4
      Top             =   480
      Width           =   2100
   End
   Begin VB.OptionButton Marek
      Caption         =   "Marek"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   9
      Top             =   1680
      Width           =   2100
   End
   Begin VB.OptionButton Jirutka
      Caption         =   "Jirutka"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   8
      Top             =   1440
      Width           =   2100
   End
   Begin VB.OptionButton Patrik
      Caption         =   "Patrik"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   7
      Top             =   1200
      Width           =   2100
   End
   Begin VB.OptionButton Ota
      Caption         =   "Ota"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   6
```

```
      Top             =   960
      Width           =   2100
   End
   Begin VB.OptionButton Ja
      Caption         =   "Ja"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   5
      Top             =   720
      Width           =   2100
   End
   Begin VB.OptionButton StationaryAfterglow
      Caption         =   "Stationary Afterglow"
      Height          =   255
      Left            =   120
      TabIndex        =   3
      Top             =   240
      Value           =   -1  'True
      Width           =   2100
   End
End
Begin MSComDlg.CommonDialog CommonDialog1
   Left            =   8400
   Top             =   2160
   _ExtentX        =   847
   _ExtentY        =   847
   _Version        =   393216
End
Begin VB.CommandButton BtnLoad
   Caption         =   "Load Settings"
   Height          =   615
   Left            =   7800
   TabIndex        =   1
   Top             =   1320
   Width           =   1695
End
Begin VB.CommandButton BtnSave
   Caption         =   "Save Settings"
   Height          =   615
   Left            =   7800
   TabIndex        =   0
   Top             =   480
   Width           =   1695
End
Begin VB.Menu mnuFile
   Caption         =   "&File"
   Begin VB.Menu mnufBrowse
      Caption         =   "&Browse for data file..."
   End
   Begin VB.Menu mnufLoadsett
      Caption         =   "&Load settings..."
   End
   Begin VB.Menu mnufSavesett
      Caption         =   "&Save settings..."
   End
   Begin VB.Menu mnuStart
      Caption         =   "S&tart program"
   End
   Begin VB.Menu mnufExit
      Caption         =   "E&xit"
   End
End
Begin VB.Menu mnuContinue
   Caption         =   "&Continue"
```

```
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuOk
      Caption         =   "&Ok"
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuSetup
      Caption         =   "&Setup"
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuParameters
      Caption         =   "&Parameters"
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuStatus
      Caption         =   "Status"
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuDetail
      Caption         =   "&Detail"
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuRegine
      Caption         =   "&Regime"
      Enabled         =   0   'False
   End
   Begin VB.Menu mnuUp
      Caption         =   "Up"
   End
   Begin VB.Menu mnuDown
      Caption         =   "Down"
   End
   Begin VB.Menu mnu5
      Caption         =   "5"
   End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_PredeclaredId = True
Attribute VB_Exposed = False
Option Explicit
Dim NazvykUlozeni As Collection
Dim DatakUlozeni As Collection
Dim sFile As Integer
Dim secondderivative As Integer
Dim EEDF As Integer
Dim Te As Integer
Dim vplasma As Integer
Dim tlakUnits As Variant
Dim teplotaUnit As Variant
Const souborPlyny = "TABULKA.GAS"
Const automatizator = "automatizator.exe"
Const start = "start.exe"

Private Declare Function GetShortPathName Lib "kernel32" Alias "GetShortPathNameA" (ByVal
lpszLongPath As String, ByVal lpszShortPath As String, ByVal lBuffer As Long) As Long

Function toString(data() As Variant)
Dim i, vystup
    vystup = ""
    For i = 0 To UBound(data)
        vystup = vystup & data(i)
    Next
```

```
    toString = vystup
End Function

Private Sub nactiPlynyGet()
    If testExistenceSouboru(souborPlyny) = True Then
        plyny.Visible = True
        Dim fLen As Integer, X As Variant, co As Variant, buff() As Byte
        fLen = FreeFile
        Open souborPlyny For Binary As #fLen Len = FileLen(souborPlyny)
            ReDim buff(LOF(fLen) - 1)
            Get #fLen, 1, buff
        Dim radky, start, pozice, radek(), i
        Set radky = New Collection
        start = 0
        For pozice = 0 To UBound(buff)
            If pozice + 1 > UBound(buff) Then
                If pozice - start > 0 Then
                    ReDim radek(pozice - start)
                    For i = start To pozice
                        If buff(i) = 9 Then
                            radek(i - start) = ";"
                        Else
                            radek(i - start) = Chr(buff(i))
                        End If
                    Next
                    radky.Add toString(radek)
                End If
            Else
                If buff(pozice) = 13 And buff(pozice + 1) = 10 Then
                    If pozice - 1 - start > 0 Then
                        ReDim radek(pozice - 1 - start)
                        For i = start To pozice - 1
                        If buff(i) = 9 Then
                            radek(i - start) = ";"
                        Else
                            radek(i - start) = Chr(buff(i))
                        End If
                        Next
                        radky.Add toString(radek)
                        start = pozice + 2
                    Else
                        start = pozice + 2
                    End If
                End If
            End If
        Next
        For i = 4 To 1 Step -1
            radky.Remove i
        Next
        For i = 1 To radky.Count
            plyny.AddItem radky.Item(i)
        Next
    End If
End Sub

Private Sub about_Click()
    frmAbout.Show
End Sub

Private Sub browse_Click()
    CommonDialog1.DialogTitle = "Enter filename with data to open:"
    CommonDialog1.InitDir = "."
    CommonDialog1.Flags = cdlOFNPathMustExist + cdlOFNNoReadOnlyReturn +
cdlOFNOverwritePrompt + cdlOFNNoLongNames
```

```
    On Error GoTo konec
    CommonDialog1.ShowOpen
    jmenosouboru = CommonDialog1.FileName
konec:
End Sub

Private Sub BtnLoad_Click()
Dim soubor As String
    CommonDialog1.DialogTitle = "Enter filename to load settings from:"
    CommonDialog1.Filter = "*.ini"
    CommonDialog1.InitDir = "."
    CommonDialog1.Flags = cdlOFNPathMustExist + cdlOFNNoReadOnlyReturn +
cdlOFNOverwritePrompt
    On Error GoTo konec
    CommonDialog1.ShowOpen
    If Right(CommonDialog1.FileName, 4) <> ".ini" Then
        CommonDialog1.FileName = CommonDialog1.FileName & ".ini"
    End If
    soubor = CommonDialog1.FileName
    Dim fLen As Integer, X As Variant, co As Variant
    coUlozit
    fLen = FreeFile
    Open soubor For Input As #fLen
        On Error Resume Next
        For X = 1 To NazvykUlozeni.Count
            Input #fLen, co
            Select Case co
                Case "jmenosouboru.text": Input #fLen, co: jmenosouboru.Text = co
                Case "sFile": Input #fLen, co: sFile = co
                Case "secondderivative": Input #fLen, co: secondderivative = co
                Case "Te": Input #fLen, co: Te = co
                Case "EEDF": Input #fLen, co: EEDF = co
                Case "vplasma": Input #fLen, co: vplasma = co
                Case "pressure.text": Input #fLen, co: pressure.Text = co
                Case "tlakUnits": Input #fLen, co: tlakUnits = co
                Case "probeRadius.text": Input #fLen, co: probeRadius.Text = co
                Case "probeLength.text": Input #fLen, co: probeLength.Text = co
                Case "teplotaMistnosti.text": Input #fLen, co: teplotaMistnosti.Text = co
                Case "ion.text": Input #fLen, co: ion.Text = co
                Case "neutral.text": Input #fLen, co: neutral.Text = co
                Case "mobility.text": Input #fLen, co: mobility.Text = co
                Case "teplota.text": Input #fLen, co: teplota.Text = co
                Case "teplotaUnit": Input #fLen, co: teplotaUnit = co
                Case "Vpl.text": Input #fLen, co: Vpl.Text = co
                Case "sffA0.text": Input #fLen, co: sffA0.Text = co
                Case "sffVp.text": Input #fLen, co: sffVp.Text = co
                Case "sffk.text": Input #fLen, co: sffK.Text = co
                Case "mnu5.Caption": Input #fLen, co: mnu5.Caption = co
                Case "Connect": Input #fLen, co: Connect.Value = co
                Case "showFit": Input #fLen, co: showFit.Value = co
                Case "maximize": Input #fLen, co: maximize.Value = co
                Case Else: Input #fLen, co
            End Select
        Next
    Close #fLen

    Select Case sFile
        Case 1: StationaryAfterglow.Value = True
        Case 2: Greifswald.Value = True
        Case 3: Ja.Value = True
        Case 4: Ota.Value = True
        Case 5: Patrik.Value = True
        Case 6: Jirutka.Value = True
        Case 7: Marek.Value = True
```

```
    End Select

    Select Case secondderivative
        Case 1: mine.Value = True
        Case 2: pont5.Value = True
        Case 3: perpartes.Value = True
    End Select

    Select Case Te
        Case 1: teid.Value = True
        Case 2: teie.Value = True
        Case 3: teui.Value = True
    End Select

    Select Case EEDF
        Case 1: max.Value = True
        Case 2: dmax.Value = True
        Case 3: stand.Value = True
    End Select

    Select Case vplasma
        Case 1: vplid.Value = True
        Case 2: vpvfl.Value = True
        Case 3: vpui.Value = True
    End Select

    Select Case tlakUnits
        Case "T": prtorr.Value = True
        Case "P": prPa.Value = True
    End Select

    Select Case teplotaUnit
        Case "eV": TeeV.Value = True
        Case "K": teK.Value = True
    End Select
    Exit Sub
konec:
End Sub

Private Sub BtnSave_Click()
Dim soubor As String
    coUlozit
    CommonDialog1.DialogTitle = "Enter filename to save to:"
    CommonDialog1.Filter = "*.ini"
    CommonDialog1.InitDir = "."
    CommonDialog1.CancelError = True
    CommonDialog1.Flags = cdlOFNPathMustExist + cdlOFNNoReadOnlyReturn +
cdlOFNOverwritePrompt
    On Error GoTo konec
    CommonDialog1.ShowSave
    If Right(CommonDialog1.FileName, 4) <> ".ini" Then
        CommonDialog1.FileName = CommonDialog1.FileName & ".ini"
    End If
    soubor = CommonDialog1.FileName
    uloz soubor
konec:
End Sub

Sub coUlozit()
    Set NazvykUlozeni = New Collection
    Set DatakUlozeni = New Collection

        NazvykUlozeni.Add "mnu5.Caption"
        DatakUlozeni.Add mnu5.Caption
```

```
NazvykUlozeni.Add "jmenosouboru.text"
DatakUlozeni.Add jmenosouboru.Text

NazvykUlozeni.Add "sFile"
DatakUlozeni.Add sFile

NazvykUlozeni.Add "secondderivative"
DatakUlozeni.Add secondderivative

NazvykUlozeni.Add "Te"
DatakUlozeni.Add Te

NazvykUlozeni.Add "EEDF"
DatakUlozeni.Add EEDF

NazvykUlozeni.Add "vplasma"
DatakUlozeni.Add vplasma

NazvykUlozeni.Add "pressure.text"
DatakUlozeni.Add pressure.Text

NazvykUlozeni.Add "tlakUnits"
DatakUlozeni.Add tlakUnits

NazvykUlozeni.Add "probeRadius.text"
DatakUlozeni.Add probeRadius.Text

NazvykUlozeni.Add "probeLength.text"
DatakUlozeni.Add probeLength.Text

NazvykUlozeni.Add "teplotaMistnosti.text"
DatakUlozeni.Add teplotaMistnosti.Text

NazvykUlozeni.Add "ion.text"
DatakUlozeni.Add ion.Text

NazvykUlozeni.Add "neutral.text"
DatakUlozeni.Add neutral.Text

NazvykUlozeni.Add "mobility.text"
DatakUlozeni.Add mobility.Text

NazvykUlozeni.Add "teplota.text"
DatakUlozeni.Add teplota.Text

NazvykUlozeni.Add "teplotaUnit"
DatakUlozeni.Add teplotaUnit

NazvykUlozeni.Add "Vpl.text"
DatakUlozeni.Add Vpl.Text

NazvykUlozeni.Add "sffA0.text"
DatakUlozeni.Add sffA0.Text

NazvykUlozeni.Add "sffVp.text"
DatakUlozeni.Add sffVp.Text

NazvykUlozeni.Add "sffk.text"
DatakUlozeni.Add sffK.Text

NazvykUlozeni.Add "Connect"
DatakUlozeni.Add Connect.Value
```

```
        NazvykUlozeni.Add "showFit"
        DatakUlozeni.Add showFit.Value

        NazvykUlozeni.Add "maximize"
        DatakUlozeni.Add maximize.Value
End Sub

Sub uloz(soubor As String)
Dim fLen As Integer, X As Variant, co As Variant
    fLen = FreeFile
    Open soubor For Output As #fLen
        For X = 1 To NazvykUlozeni.Count
            co = NazvykUlozeni.Item(X)
            Write #fLen, co
            co = DatakUlozeni.Item(X)
            Write #fLen, co
        Next
    Close #fLen
End Sub

Function testExistenceSouboru(cesta As String) As Boolean
Dim fso As Object
    Set fso = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
    If fso.fileexists(cesta) Then
        testExistenceSouboru = True
    Else
        testExistenceSouboru = False
    End If
End Function

Private Sub BtnStart_Click()
Const Space = " "
Dim startstring As String

    If maximize Then startstring = startstring + "mx" + Space

    Select Case sFile
        Case 1: startstring = startstring + "f1" + Space
        Case 2: startstring = startstring + "f2" + Space
        Case 3: startstring = startstring + "f3" + Space
        Case 4: startstring = startstring + "f4" + Space
        Case 5: startstring = startstring + "f5" + Space
        Case 6: startstring = startstring + "f6" + Space
        Case 7: startstring = startstring + "f7" + Space
    End Select

    If Connect.Value Then startstring = startstring + "co" + Space

    Select Case secondderivative
        Case 1: startstring = startstring + "dm" + Space
        Case 2: startstring = startstring + "d5" + Space
        Case 3: startstring = startstring + "dp" + Space
    End Select

    Select Case EEDF
        Case 1: startstring = startstring + "em" + Space
        Case 2: startstring = startstring + "ed" + Space
        Case 3: startstring = startstring + "es" + Space
    End Select

    Select Case Te
        Case 1: startstring = startstring + "td" + Space
        Case 2: startstring = startstring + "ti" + Space
        Case 3: startstring = startstring + "tu" + Space
```

```
    End Select

    Select Case vplasma
        Case 1: startstring = startstring + "vd" + Space
        Case 2: startstring = startstring + "vf" + Space
        Case 3: startstring = startstring + "vu" + Space
    End Select

    If showFit.Value = 0 Then startstring = startstring + "sf" + Space

    If Val(pressure.Text) <> 0 Then
        If tlakUnits = "T" Then
            startstring = startstring + "pT" + pressure.Text + Space
        End If
        If tlakUnits = "P" Then
            startstring = startstring + "pP" + pressure.Text + Space
        End If
    End If

    If Val(probeRadius.Text) <> "0" And Val(probeLength.Text) <> "0" Then
        startstring = startstring + "pR" + probeRadius.Text + ":" + probeLength.Text + Space
    End If

    If Val(teplotaMistnosti.Text) <> "300" And teplotaMistnosti.Text <> "" Then
        startstring = startstring + "tr" + teplotaMistnosti.Text + Space
    End If

    If Val(ion.Text) <> "0" And Val(neutral.Text) <> "0" And Val(mobility.Text) <> "0" Then
        startstring = startstring + "gP" + ion.Text + ":" + neutral.Text + ":" +
mobility.Text + Space
    End If

    If Val(teplota.Text) <> 0 Then
        If teplotaUnit = "K" Then
            startstring = startstring + "TK" + teplota.Text + Space
        End If
        If teplotaUnit = "eV" Then
            startstring = startstring + "TV" + teplota.Text + Space
        End If
    End If

    If Val(Vpl.Text) <> "0" And Vpl.Text <> "" Then
        startstring = startstring + "Vp" + Vpl.Text + Space
    End If

    If Val(sffA0.Text) <> "0" And Val(sffVp.Text) <> "0" And Val(sffK.Text) <> "0" Then
        startstring = startstring + "FF" + sffA0.Text + ":" + sffVp.Text + ":" + sffK.Text +
Space
    End If


    If jmenosouboru.Text <> "" Then
        If GetShortPath(jmenosouboru.Text) <> "" Then
            startstring = startstring + "f:" + """ + GetShortPath(jmenosouboru.Text) + """
+ Space
        Else
            MsgBox "Error openning data file name: " & vbCr & vbLf & """ & jmenosouboru.Text
& """ & vbCr & vbLf _
            & "May be ""File doesn't exist"" or ""Path too long (more than 164 chars)""" &
vbCr & vbLf _
            & "Try """ & browse.Caption & """ button!", vbCritical
            Exit Sub
        End If
    End If
```

```
    If mnu5.Caption <> "5" Then
        startstring = startstring + "m5" + mnu5.Caption + Space
    End If

    Shell automatizator + Space + startstring, vbNormalFocus
End Sub

Public Function GetShortPath(soubor As String) As String
    Dim delka As Long, cesta As String
    cesta = String$(165, 0)
    delka = GetShortPathName(soubor, cesta, 164)
    GetShortPath = Left(cesta, delka)
End Function

Private Sub Form_Load()
    Me.Caption = "GUI for: 'Langmuir probe data evaluation, MFF UK Prague'"
    nactiPlynyGet
    If Not testExistenceSouboru(start) Then chyba start
    If Not testExistenceSouboru(automatizator) Then chyba automatizator
    sFile = 1
End Sub

Private Sub chyba(soubor As String)
        MsgBox "File '" & soubor & "' was not found in '" + App.Path + "'!" + vbLf + "GUI
will not be able to run the application.", vbCritical, Me.Caption
        BtnStart.Enabled = False
        mnuStart.Enabled = False
End Sub

Private Sub mnu5_Click()
Dim stara As Integer
    stara = mnu5.Caption
    mnu5.Caption = InputBox("Enter new value:", Me.Caption)
    If mnu5.Caption = "" Then mnu5.Caption = stara
    If IsNumeric(mnu5.Caption) Then
        If mnu5.Caption > 32767 Then mnu5.Caption = 32767
        If mnu5.Caption < -32768 Then mnu5.Caption = -32768
    Else
        mnu5.Caption = stara
    End If
End Sub

Private Sub mnuDown_Click()
Dim stara As Integer
    stara = mnu5.Caption
    mnu5.Caption = mnu5.Caption - 1
    If mnu5.Caption < -32768 Then mnu5.Caption = -32768
End Sub

Private Sub mnufBrowse_Click()
    browse_Click
End Sub

Private Sub mnufExit_Click()
    End
End Sub

Private Sub mnufLoadsett_Click()
    BtnLoad_Click
End Sub

Private Sub mnufSavesett_Click()
    BtnSave_Click
```

```
End Sub

Private Sub mnuStart_Click()
    BtnStart_Click
End Sub

Private Sub mnuUp_Click()
Dim stara As Integer
    stara = mnu5.Caption
    mnu5.Caption = mnu5.Caption + 1
    If mnu5.Caption > 32767 Then mnu5.Caption = 32767
End Sub

Private Sub plyny_Click()
Dim data
    If plyny.ListIndex = -1 Then
        plyny.Text = ""
        Exit Sub
    End If
    data = Split(plyny.Text, ";")
    mobility.Text = data(2)
    ion.Text = data(4)
    neutral.Text = data(5)
End Sub

Private Sub StationaryAfterglow_Click()
    sFile = 1
End Sub

Private Sub Greifswald_Click()
    sFile = 2
End Sub

Private Sub Ja_Click()
    sFile = 3
End Sub

Private Sub Ota_Click()
    sFile = 4
End Sub

Private Sub Patrik_Click()
    sFile = 5
End Sub

Private Sub Jirutka_Click()
    sFile = 6
End Sub

Private Sub Marek_Click()
    sFile = 7
End Sub

Private Sub max_Click()
    EEDF = 1
End Sub

Private Sub dmax_Click()
    EEDF = 2
End Sub

Private Sub stand_Click()
    EEDF = 3
End Sub
```

```
Private Sub mine_Click()
    secondderivative = 1
End Sub

Private Sub pont5_Click()
    secondderivative = 2
End Sub

Private Sub perpartes_Click()
    secondderivative = 3
End Sub

Private Sub prPa_Click()
    tlakUnits = "P"
End Sub

Private Sub prtorr_Click()
    tlakUnits = "T"
End Sub

Private Sub TeeV_Click()
    teplotaUnit = "eV"
End Sub

Private Sub teK_Click()
    teplotaUnit = "K"
End Sub

Private Sub teid_Click()
    Te = 1
End Sub

Private Sub teie_Click()
    Te = 2
End Sub

Private Sub teui_Click()
    Te = 3
End Sub

Private Sub vplid_Click()
    vplasma = 1
End Sub

Private Sub vpvfl_Click()
    vplasma = 2
End Sub

Private Sub vpui_Click()
    vplasma = 3
End Sub
```

8.2 Příloha 2: Zdrojový kód - soubor “automatizator.au3”:

```
#Region ;**** Directives created by AutoIt3Wrapper_GUI ****
#AutoIt3Wrapper_Compression=4
#AutoIt3Wrapper_Res_Comment=Made as part of my thesis in 2011.
#AutoIt3Wrapper_Res_Description=Interface between "GUI.exe" and "start.exe"
#AutoIt3Wrapper_Res_LegalCopyright=Jan Jedlička 2011, released to Public Domain
#AutoIt3Wrapper_Res_SaveSource=y
#AutoIt3Wrapper_Run_Tidy=y
#Tidy_Parameters=/gd /rel
#EndRegion ;**** Directives created by AutoIt3Wrapper_GUI ****
Run('START.EXE')
_WinWaitActivate("Langmuir probe data evaluation, MFF UK Prague", "")
Send("{space}")
_WinWaitActivate("Langmuir probe data evaluation, MFF UK Prague", "")
$cas = 250
For $i = 0 To $CmdLine[0]
	$parametr = $CmdLine[$i]
	Switch StringLeft($parametr, 2)
		Case "mx"
;~ maximalizovat okno
			Send("!{SPACE}")
			Send("x")
			Sleep($cas)
		Case "m5"
			$kolik = StringTrimLeft($parametr, 2)
			$pocet = 0
			If $kolik > 5 Then
				While $pocet + 5 < $kolik
					Send("!u")
					Sleep(100)
					$pocet = $pocet + 1
				WEnd
			ElseIf $kolik < 5 Then
				$pocet = 5 - $kolik
				$i = 0
				While $i < $pocet
					Send("!f{left 3}")
					Sleep(100)
					Send("{enter}")
					$i = $i + 1
				WEnd
			EndIf
			Sleep(250)
		Case "f1"
;~ nastav format vstupniho souboru StationaryAfterglow
			Send("!f{down 4}")
			Sleep($cas)
			Send("{enter}")
		Case "f2"
;~ nastav format vstupniho souboru Greifswald
			Send("!f{down 5}")
			Sleep($cas)
			Send("{enter}")
		Case "f3"
;~ nastav format vstupniho souboru Ja
			Send("!f{down 6}")
			Sleep($cas)
			Send("{enter}")
		Case "f4"
;~ nastav format vstupniho souboru Ota
			Send("!f{down 7}")
			Sleep($cas)
```

```
                    Send("{enter}")
            Case "f5"
;~ nastav format vstupniho souboru Patrik
                    Send("!f{down 8}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "f6"
;~ nastav format vstupniho souboru Jirutka
                    Send("!f{down 9}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "f7"
;~ nastav format vstupniho souboru Marek
                    Send("!f{down 10}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "f:"
;~      otevre soubor s daty
                    $cesta = (StringTrimLeft($parametr, 2))
                    Send("!f{enter}")
                    Send($cesta & "{enter}")
            Case "co"
;~      nastav setup/Connect
                    Send("!s")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "dm"
;~      nastav setup/2.derivative/mine
                    Send("!s{down}{right}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "d5"
;~      nastav setup/2.derivative/5point
                    Send("!s{down}{right}{down}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "dp"
;~      nastav setup/2.derivative/per partes
                    Send("!s{down}{right}{down 2}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "em"
;~      nastav setup/EEDF/Maxwellian
                    Send("!s{down 2}{right}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "ed"
;~      nastav setup/EEDF/double Maxwell
                    Send("!s{down 2}{right}{down}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "es"
;~      nastav setup/EEDF/standard
                    Send("!s{down 2}{right}{down 2}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "td"
;~      nastav setup/Te/From I"
                    Send("!s{down 3}{right}")
                    Sleep($cas)
                    Send("{enter}")
            Case "ti"
;~      nastav setup/Te/from I
                    Send("!s{down 3}{right}{down}")
```

```
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "tu"
;~      nastav setup/Te/User input
                        Send("!s{down 3}{right}{down 2}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "vd"
;~      nastav setup/vplasma/From I"
                        Send("!s{down 4}{right}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "vf"
;~      nastav setup/v plasma/from Vpl
                        Send("!s{down 4}{right}{down}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "vu"
;~      nastav setup/vplasma/User input
                        Send("!s{down 4}{right}{down 2}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "sf"
;~      vypni setup/show fit
                        Send("!s{down 5}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
;~ parameters
                Case "tr"
;~  room temperature
                        Send("!p{down 4}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                        Send(StringTrimLeft($parametr, 2))
                        Send("{enter}")
                Case "pT"
;~      pressure Torr
                        Send("!p{enter}")
                        Send(StringTrimLeft($parametr, 2))
                        Send("{tab}{left}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "pP"
;~      pressure Pascal
                        Send("!p{enter}")
                        Send(StringTrimLeft($parametr, 2))
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "pR"
;~      probe radius + length
                        Send("!pp{enter}")
                        $pole = StringSplit(StringTrimLeft($parametr, 2), ":")
;~      radius=$pole[1]
;~      length=$pole[2]
                        Send($pole[1])
                        Send("{tab}")
                        Send($pole[2])
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "gP"
;~      gas parameters: ion + neutral + mobility
                        Send("!pg{enter}")
                        $pole = StringSplit(StringTrimLeft($parametr, 2), ":")
;~      ion=$pole[1]
```

```
;~      neutral=$pole[2]
;~      mobility=$pole[3]
                        Send($pole[1])
                        Send("{tab}")
                        Send($pole[2])
                        Send("{tab}")
                        Send($pole[3])
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "TK"
;~      electron temperature Kelvin
                        Send("!pt{enter}")
                        Send(StringTrimLeft($parametr, 2))
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "TV"
;~      electron temperature eV
                        Send("!pt{enter}")
                        Send(StringTrimLeft($parametr, 2))
                        Send("{tab}{right}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "Vp"
;~      plasma potential
                        Send("!pv")
                        Send(StringTrimLeft($parametr, 2))
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case "FF"
;~      Standard function fit A0 + Vp + k
                        Send("!ps")
                        $pole = StringSplit(StringTrimLeft($parametr, 2), ":")
;~      A0=$pole[1]
;~      Vp=$pole[2]
;~      k=$pole[3]
                        Send($pole[1])
                        Send("{tab}")
                        Send($pole[2])
                        Send("{tab}")
                        Send($pole[3])
                        Send("{tab}")
                        Sleep($cas)
                        Send("{enter}")
                Case Else
        EndSwitch
Next
Exit
#Region --- Internal functions Au3Recorder Start ---
Func _WinWaitActivate($title, $text, $timeout = 0)
        WinWait($title, $text, $timeout)
        If Not WinActive($title, $text) Then WinActivate($title, $text)
        WinWaitActive($title, $text, $timeout)
EndFunc   ;==>_WinWaitActivate
#EndRegion --- Internal functions Au3Recorder Start ---
```