

PRAKTIKUM Z FYZIKY PLAZMATU

Diagnostika plazmatu doutnavého výboje pomocí jednoduché sondy

Zpracovali: Radek Horňák, Lukáš Vrána

Naměřeno: 1. 3. 2022

1 Teorie

1.1 Elektrostatická Langmuirova sonda

Langmuirova sonda je vodič malých rozměrů zavedený do plazmatu, pomocí něž lze měřit nejdůležitější parametry plazmatu jako elektronovou hustotu n_e , teplotu elektronů T_e , rozdělovací funkci elektronů $f(v)$ a prostorové rozdělení potenciálu a elektrického pole. Napětí sondy V_S určujeme vzhledem k referenční elektrodě. Potenciál plazmatu v místě sondy vůči stejné referenční elektrodě označme V_p . Pokud je vůči ní plocha sondy velmi malá, můžeme sondu nazvat jednoduchou. Podle tvaru lze dále sondy dělit na válcové, kulové a rovinné. Závislost proudu protékajícího sondou I_S na napětí přiloženém na sondu V_S tvoří voltamperovou (VA) charakteristiku sondy. Napětí sondy vůči plazmovému potenciálu U_S získáme pomocí vztahu

$$U_S = V_S - V_p \quad (1)$$

Pokud sonda není připojena k vnějšímu obvodu a proud elektronů i iontů na ni se ustálí, je výsledný proud nulový a sonda se ustálí na napětí V_{fl} , tedy na plovoucím potenciálu.

VA charakteristiku jednoduché sondy můžeme rozdělit na tři části. Tou první je oblast saturovaného iontového proudu označená na obr. 1 jako *A*. Sonda je záporně nabita vzhledem k potenciálu plazmatu, elektrony jsou odpuzovány a ionty naopak přitahovány. Vizuálně se to projevuje temným prostorem obalujícím sondu.

Druhou část charakteristiky tvoří přechodová oblast, pro kterou lze U_S vymezit jako $-2(V_p - V_{fl}) \leq U_S \leq 0$. Na obr. 1 se jedná o oblast *B*. Celkový proud sondou I_S můžeme vyjádřit jako

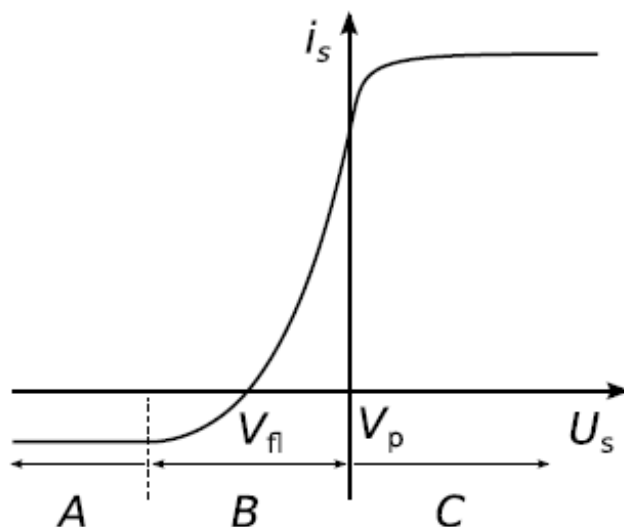
$$I_S = I_i + I_e \quad (2)$$

kde I_i je iontový proud a I_e elektronový proud, který je dán vztahem

$$I_e = S n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \exp\left(\frac{-eU_S}{kT_e}\right) \quad (3)$$

kde S je povrch sondy, e elementární náboj, n_e koncentrace elektronů, k Boltzmanova konstanta a m_e hmotnost elektronu.

Oblast saturovaného elektronového proudu je na obr. 1 označená jako *C*. Sonda je vzhledem k potenciálu plazmatu na kladném napětí a přitahuje tak elektrony. U válcové sondy nejvíce tato oblast nasycení, nýbrž parabolicky narůstá.

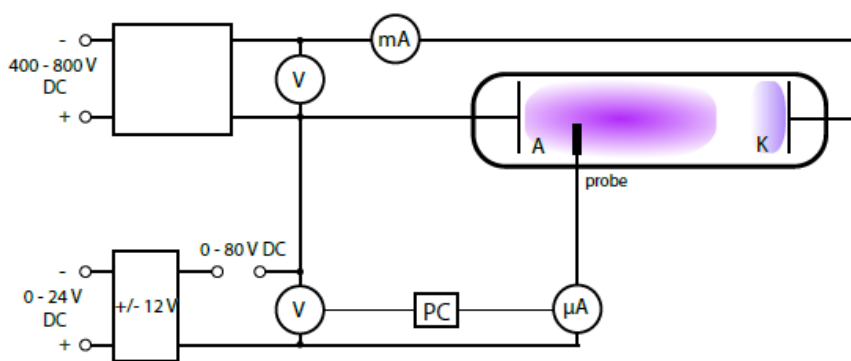


Obrázek 1: VA charakteristika jednoduché rovinné sondy [1].

2 Měření a výsledky

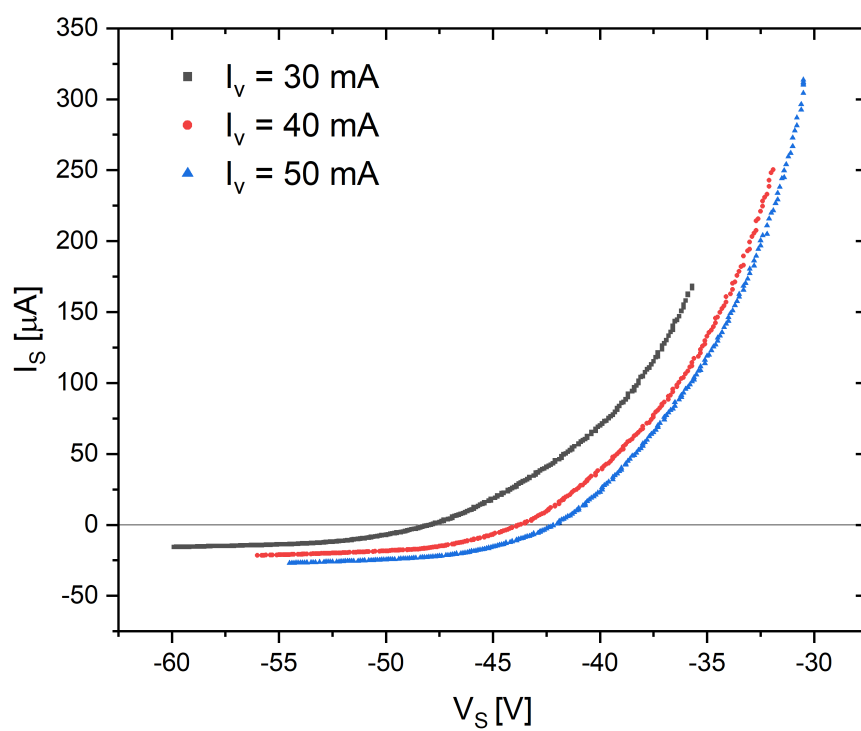
Měření provádíme na aparatuře, jejíž schéma je vidět na obr. 2. Výbojka je čerpaná rotační olejovou vývěvou. Tlak nastavujeme změnou průtoku argonu a měříme jej Piraniho manometrem. Do výbojky je zavedená jednoduchá válcová sonda, jejíž délku jsme odhadli na 8 mm a průměr 0,1 mm. Povrch podstavy válcové sondy je k povrchu jejího pláště S zanedbatelný, po zaokrouhlení dostáváme $S = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

Při měření vždy nejprve nalezneme plovoucí potenciál, abychom měli jistotu, že naměříme oblast nalevo i napravo od něj. Napětí přiložené na sondu V_s se mění automaticky pomocí potenciometru, který je poháněn elektrickým motorkem, kde stačí zařadit rychlostní stupeň v jednom ze směrů chodu. Data jsou ukládána na počítač. Při vyhodnocování jsme je museli synchronizovat.

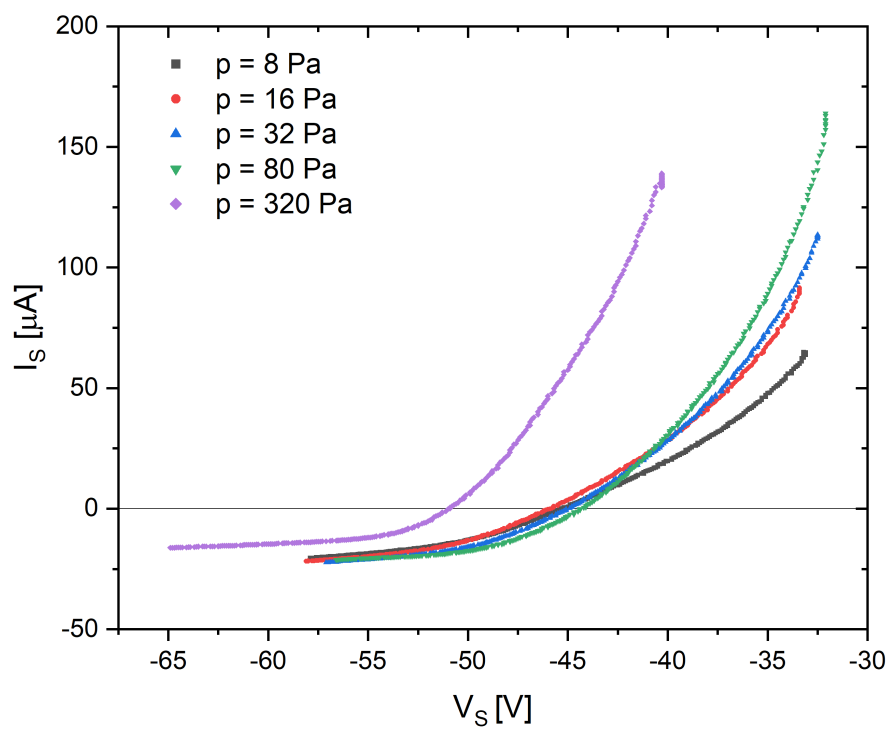


Obrázek 2: Schéma aparatury [1].

Provedli jsme měření za konstantního tlaku 160 Pa pro tři hodnoty výbojového proudu I_v . Výsledné VA charakteristiky jsou v grafu na obr. 3. Z nich lze určit plovoucí potenciál, který se s rostoucím výbojovým proudem zvětšuje, viz tab. 1. Dále jsme provedli měření za konstantního výbojového proudu 40 mA pro pět hodnot tlaku. Odpovídající VA charakteristiky jsou v grafu na obr. 4. Pro tlak 320 Pa je plovoucí potenciál nejmenší, v oblasti 8–80 Pa však nevykazuje žádný trend, viz tab. 1.

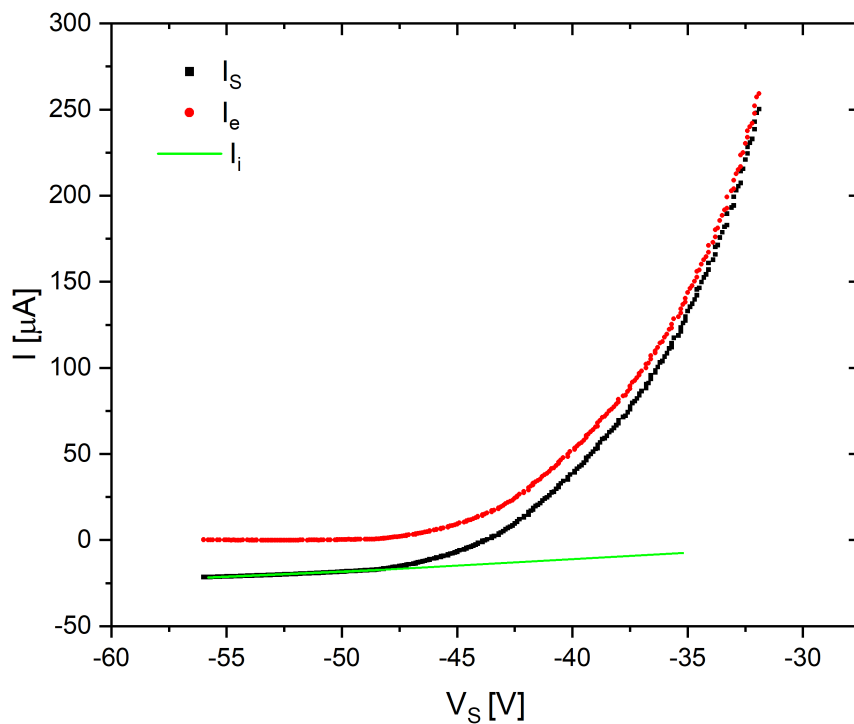


Obrázek 3: Naměřené VA charakteristiky za konstantního tlaku 160 Pa.

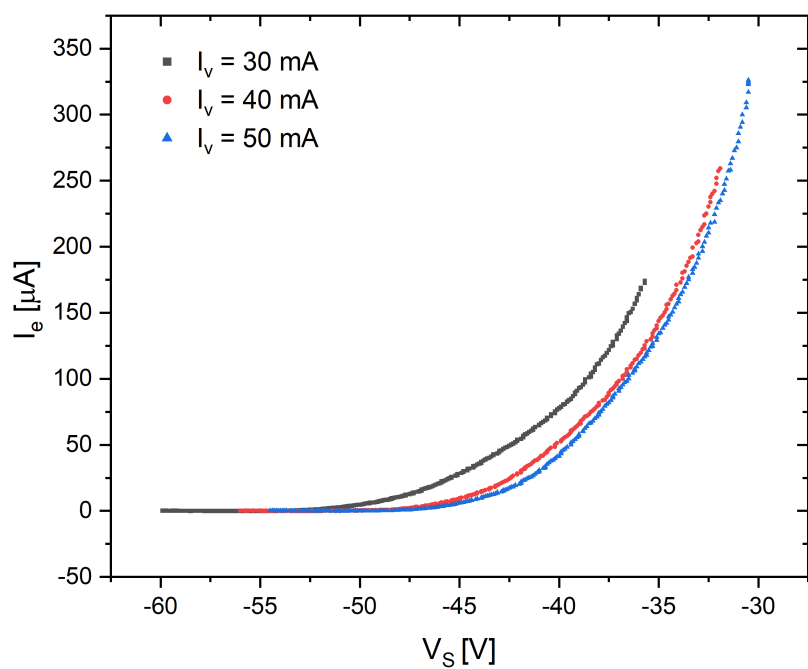


Obrázek 4: Naměřené VA charakteristiky za konstantního výbojového proudu 40 mA.

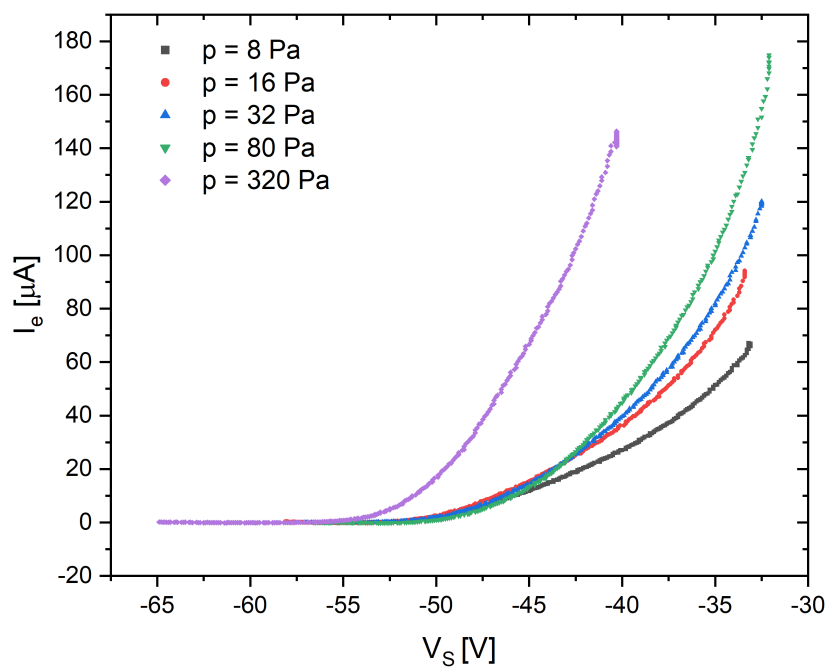
Nyní je potřeba od charakteristik odečíst iontový proud, oblast kde saturuje jsme proložili přímkou. Názorné proložení pro VA charakteristiku za podmínek $p = 160$ Pa a $I_v = 40$ mA je na obr. 5. Ve zbylých případech jsme postupovali obdobně. VA charakteristiky s takto odečteným iontovým proudem jsou v grafech na obr. 6 a 7.



Obrázek 5: Lineární fit saturovaného iontového proudu, $p = 160$ Pa a $I_v = 40$ mA.



Obrázek 6: VA charakteristiky s odečteným iontovým proudem pro měření s konstantním tlakem $p = 160 \text{ Pa}$.



Obrázek 7: VA charakteristiky s odečteným iontovým proudem pro měření s konstantním proudem $I_v = 40 \text{ mA}$.

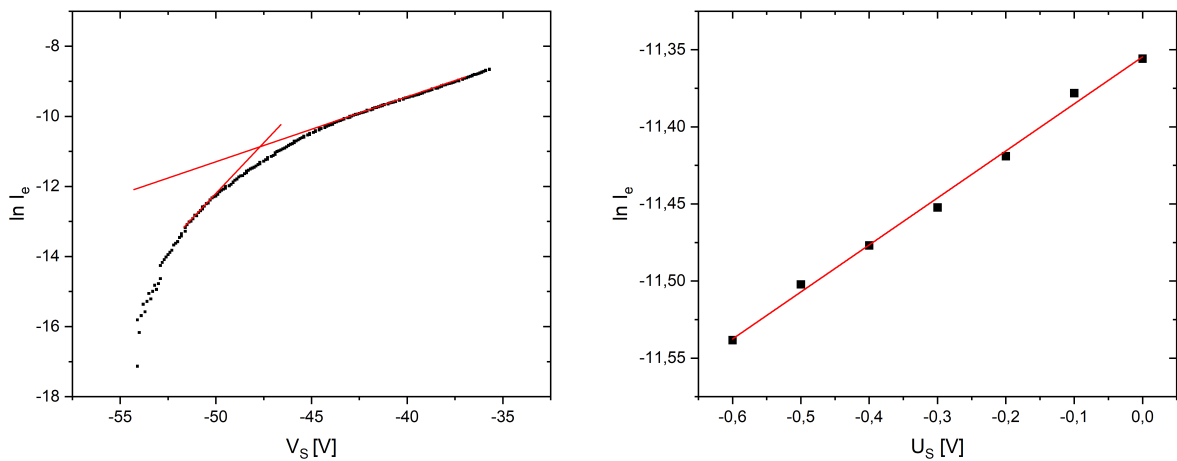
Potenciál plazmatu V_p přibližně určíme ze zlomu VA charakteristik jako průsečík asymptot k lineárním částem zlogaritmovaných závislostí. Postup je vidět na obrázcích 8 až 15 vlevo a výsledné V_p jsou uvedeny v tab. 1. Pokud máme proměřený dostatečný počet bodů, tak můžeme potenciál plazmatu určit také pomocí provedení druhé derivace, protože sondová charakteristika má v potenciálu plazmatu inflexní bod. Druhé derivace jsou vyneseny na obr. 16 až 23. Takto určený potenciál plazmatu je v tab. 1 označen jako $V_{p,d}$. Vždy platí, že V_p je větší než V_{fl} . Stejně jako V_{fl} , potenciál plazmatu s rostoucím výbojovým proudem roste, při změně tlaku nevykazuje žádný trend. Nyní můžeme ze vztahu (1) dopočítat U_S . Pokud následně vyneseme do grafů závislosti $\ln I_e = -\frac{e}{kT_e}U_S + C$ pro oblasti $-2(V_p - V_{fl}) \leq U_S \leq 0$, můžeme z elektronového proudu pro $U_S = 0$ dle vztahu (3) dopočítat koncentraci elektronů. Závislosti $\ln I_e = f(U_S)$ proložené přímkou jsou na obrázcích 8 až 23 vpravo. Výsledné elektronové teploty a koncentrace elektronů jsou v tab. 2. S rostoucím výbojovým proudem roste i koncentrace elektronů. Metodou průsečíků asymptot teplota elektronů s výbojovým proudem klesá, ale metodou druhé derivace je konstantní. S rostoucím tlakem pozorujeme klesající teplotu a rostoucí koncentrace elektronů při použití obou metod. Rozdílem výsledků metod je hlavně nižší plazmový potenciál a koncentrace elektronů, jejichž závislost je výraznější při použití metody druhé derivace. V obou metodách jsme však ve stejném řádu 10^{14} m^{-3} .

Tabulka 1: Plovoucí a plazmové potenciály

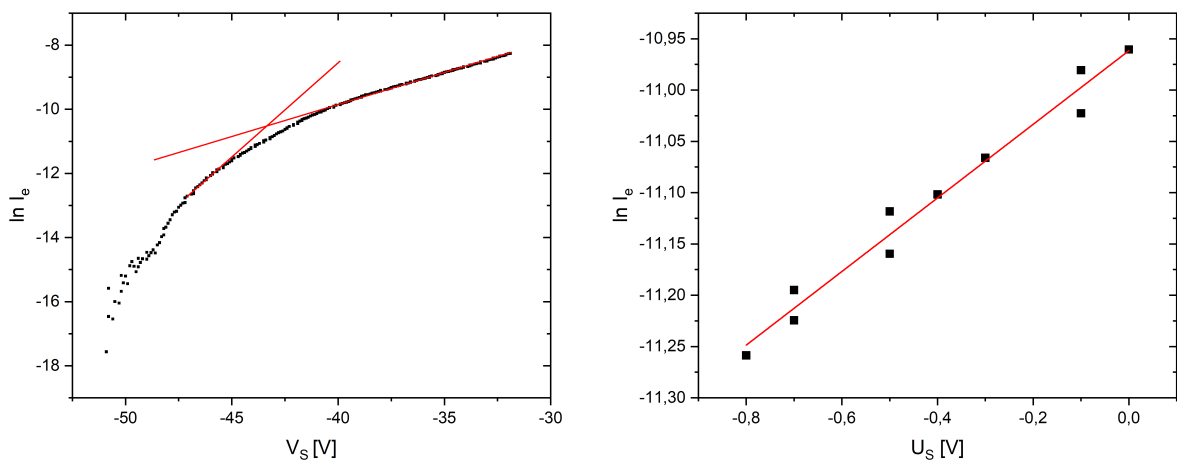
| $p = 160 \text{ Pa}$ | | | | $I_v = 40 \text{ mA}$ | | | |
|----------------------|---------------------|------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------|
| $I_v [\text{mA}]$ | $V_{fl} [\text{V}]$ | $V_p [\text{V}]$ | $V_{p,d} [\text{V}]$ | $p [\text{Pa}]$ | $V_{fl} [\text{V}]$ | $V_p [\text{V}]$ | $V_{p,d}$ |
| 30 | -48,0 | -47,7 | -43,4 | 8 | -45,3 | -44,8 | -43,8 |
| 40 | -43,8 | -43,4 | -39,7 | 16 | -45,8 | -45,2 | -44,4 |
| 50 | -42,2 | -41,6 | -37,5 | 32 | -45,0 | -44,6 | -43,4 |
| | | | | 80 | -44,4 | -43,9 | -42,8 |
| | | | | 200 | -50,9 | -49,9 | -45,8 |

Tabulka 2: Teploty a koncentrace elektronů

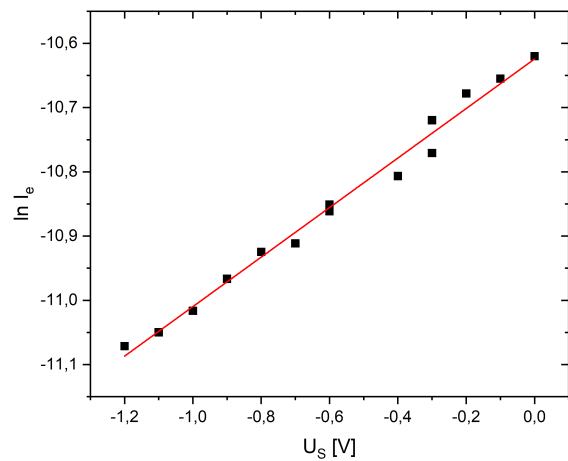
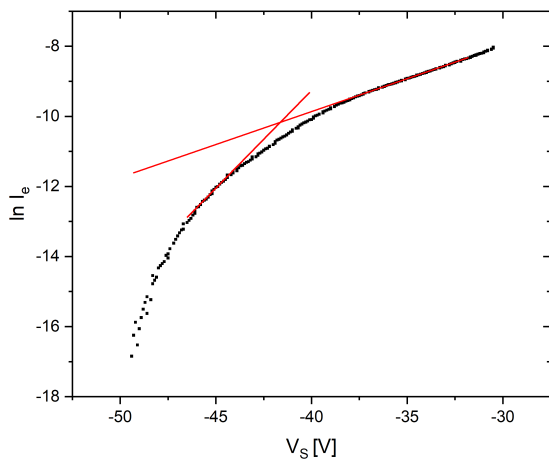
| $p = 160 \text{ Pa}$ | | | $I_v = 40 \text{ mA}$ | | |
|----------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------------|
| $I_v [\text{mA}]$ | $T [\text{eV}]$ | $n_e [10^{14} \text{ m}^{-3}]$ | $p [\text{Pa}]$ | $T [\text{eV}]$ | $n_e [10^{14} \text{ m}^{-3}]$ |
| 30 | 3,3 | 1,0 | 8 | 4,6 | 0,8 |
| 40 | 2,8 | 1,6 | 16 | 4,3 | 1,1 |
| 50 | 2,6 | 2,3 | 32 | 4,0 | 1,2 |
| | | | 80 | 3,7 | 1,4 |
| | | | 200 | 2,2 | 1,7 |
| $I_v [\text{mA}]$ | $T_d [\text{eV}]$ | $n_{e,d} [10^{14} \text{ m}^{-3}]$ | $p [\text{Pa}]$ | $T_d [\text{eV}]$ | $n_{e,d} [10^{14} \text{ m}^{-3}]$ |
| 30 | 2,4 | 4,0 | 8 | 4,4 | 1,1 |
| 40 | 2,4 | 5,4 | 16 | 4,0 | 1,3 |
| 50 | 2,5 | 7,7 | 32 | 3,8 | 1,6 |
| | | | 80 | 3,5 | 2,0 |
| | | | 200 | 2,0 | 6,0 |



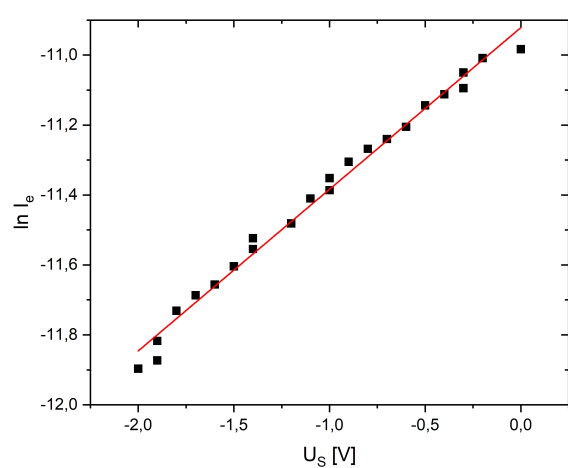
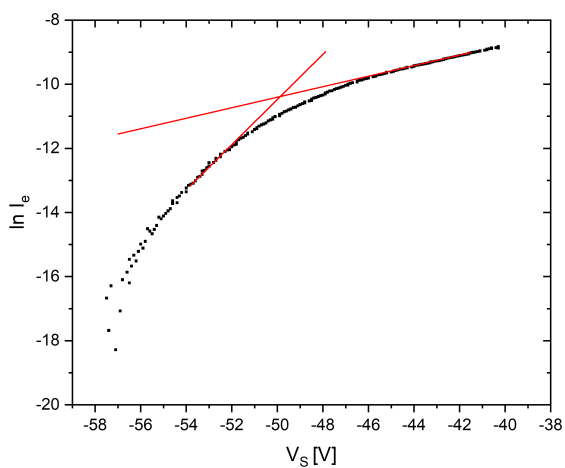
Obrázek 8: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 160$ Pa a $I_v = 30$ mA.



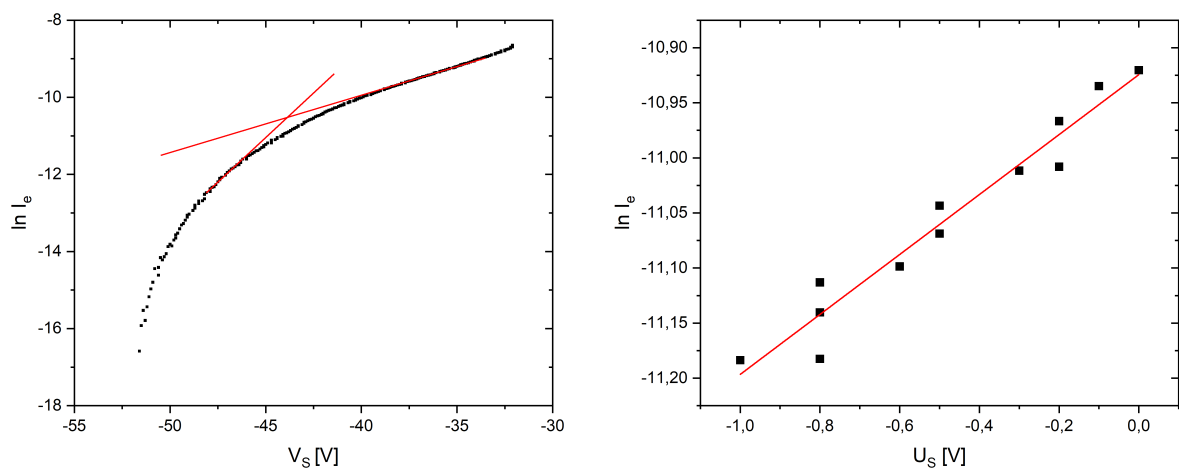
Obrázek 9: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 160$ Pa a $I_v = 40$ mA.



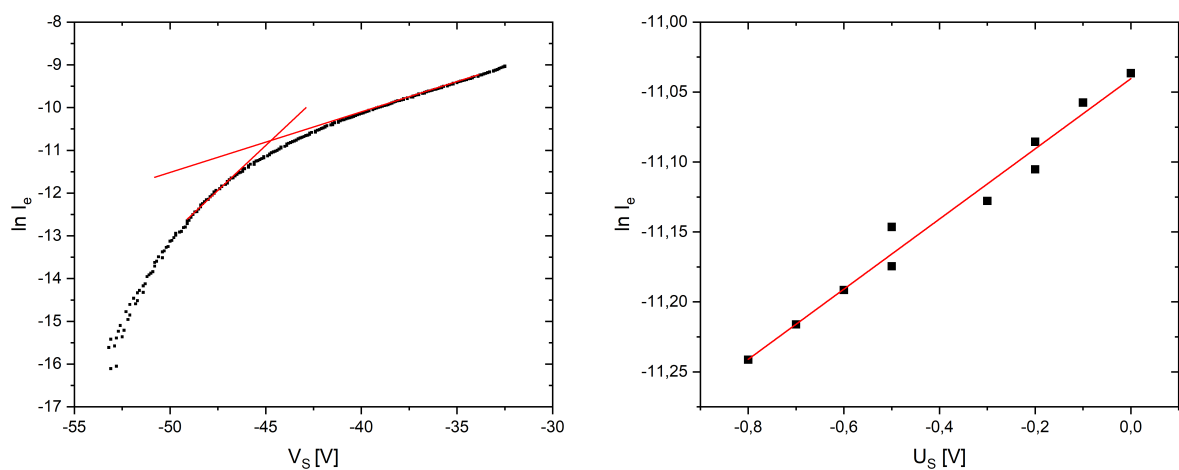
Obrázek 10: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 160$ Pa a $I_v = 50$ mA.



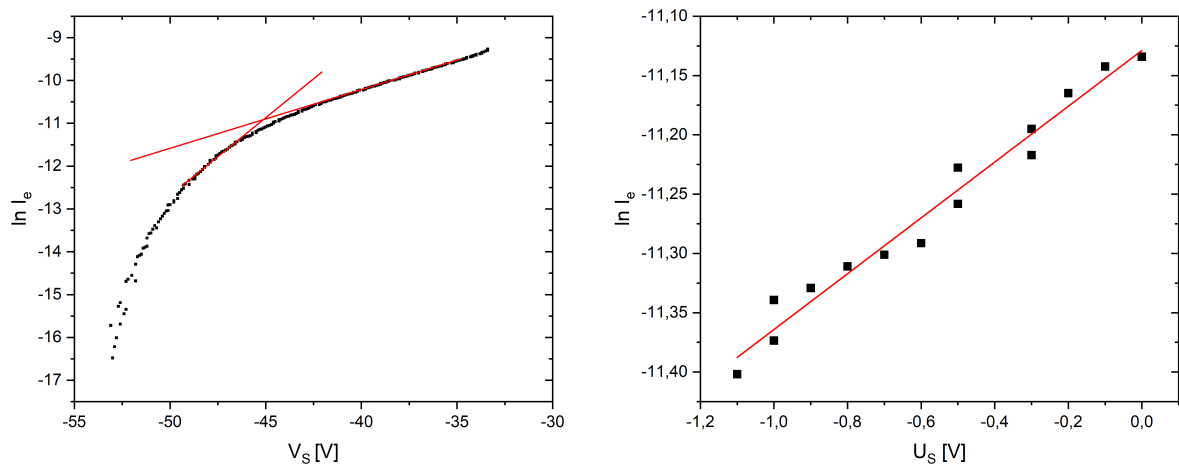
Obrázek 11: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 320$ Pa a $I_v = 40$ mA.



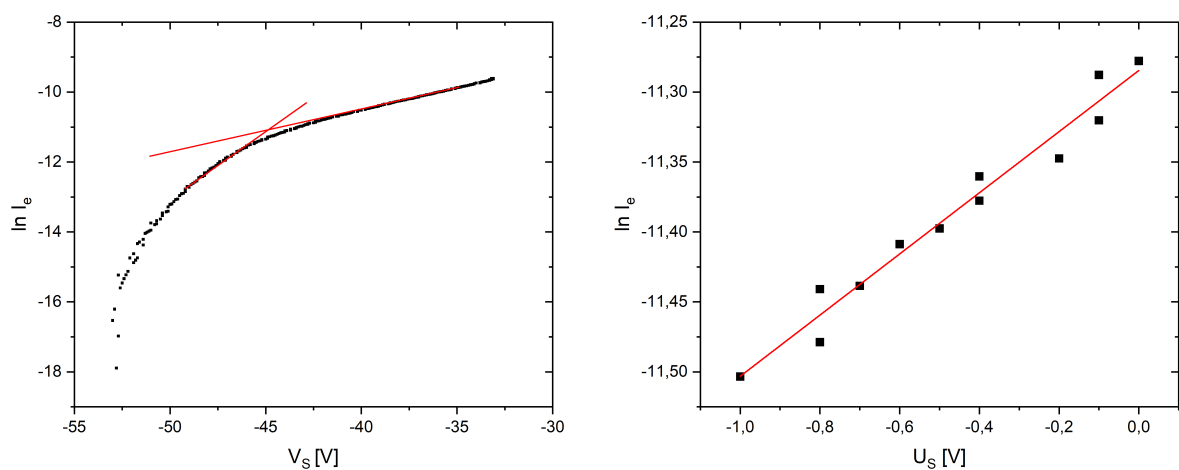
Obrázek 12: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 80$ Pa a $I_v = 40$ mA.



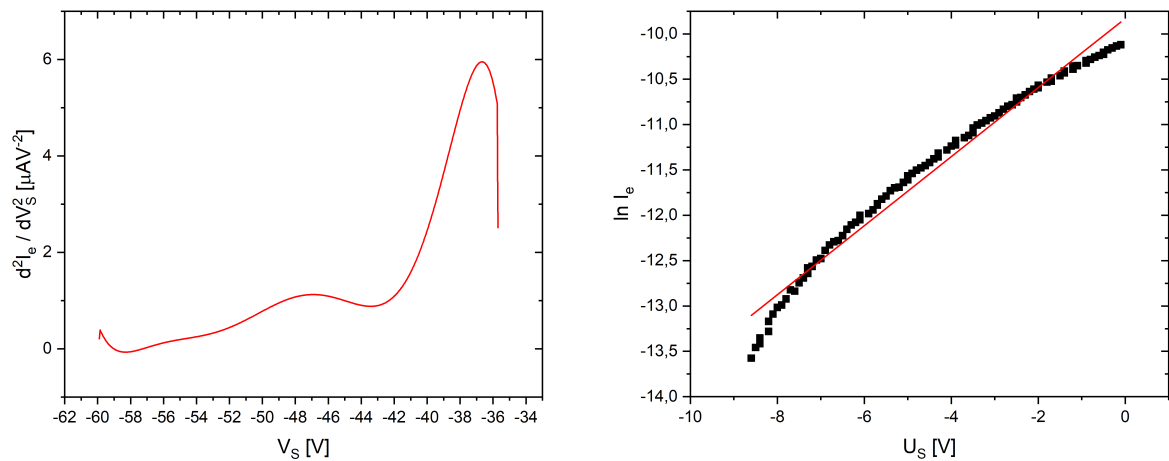
Obrázek 13: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 32$ Pa a $I_v = 40$ mA.



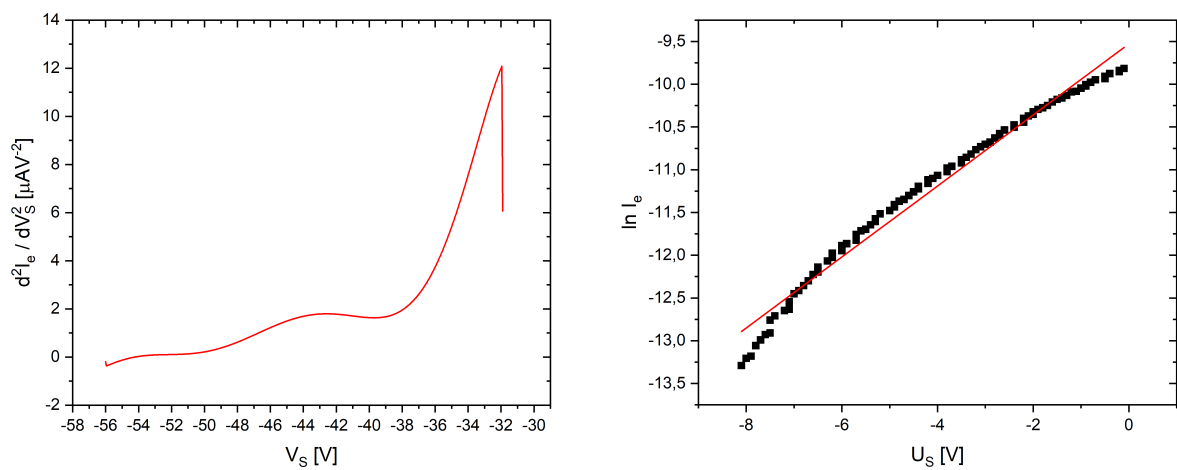
Obrázek 14: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 16$ Pa a $I_v = 40$ mA.



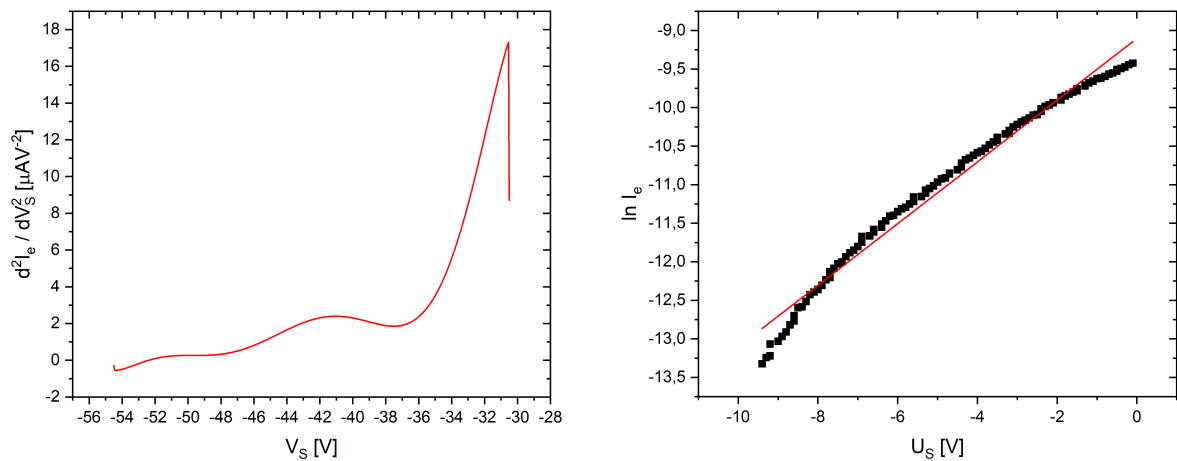
Obrázek 15: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí průsečíku asymptot, $p = 8$ Pa a $I_v = 40$ mA.



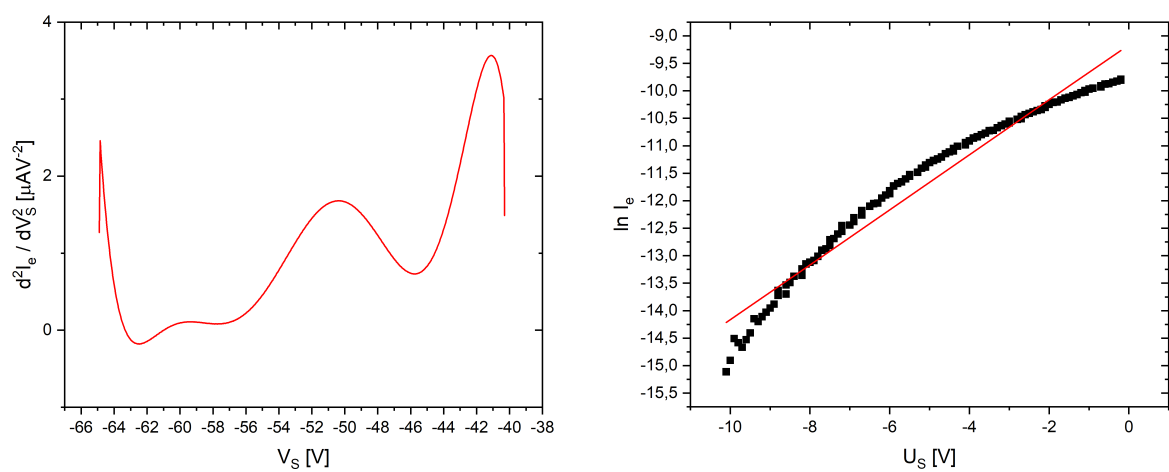
Obrázek 16: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 160$ Pa a $I_v = 30$ mA.



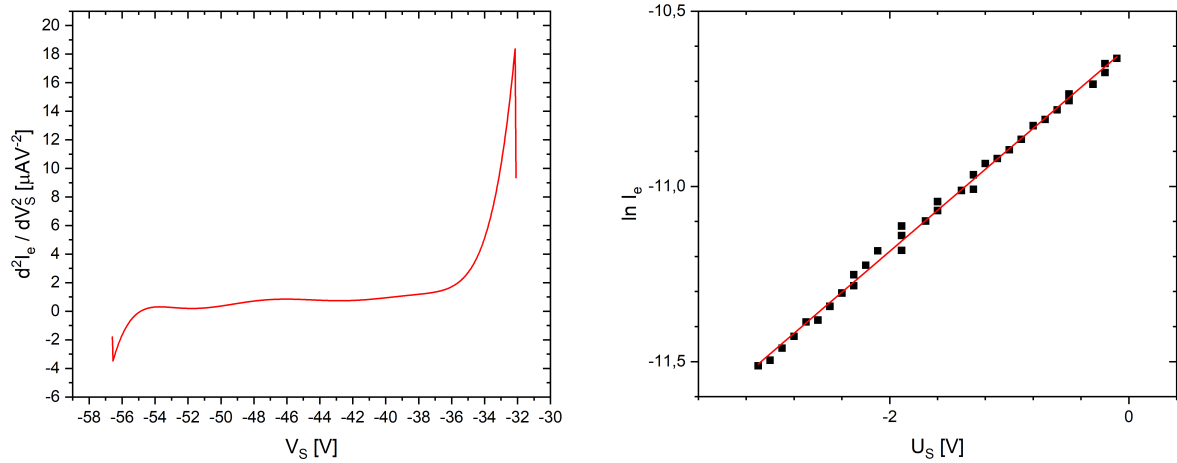
Obrázek 17: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 160$ Pa a $I_v = 40$ mA.



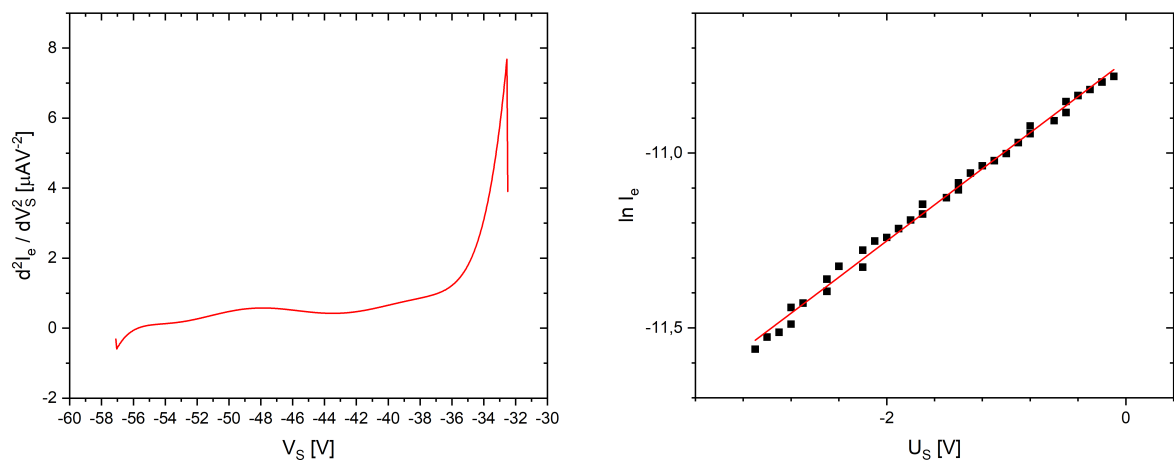
Obrázek 18: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 160$ Pa a $I_v = 50$ mA.



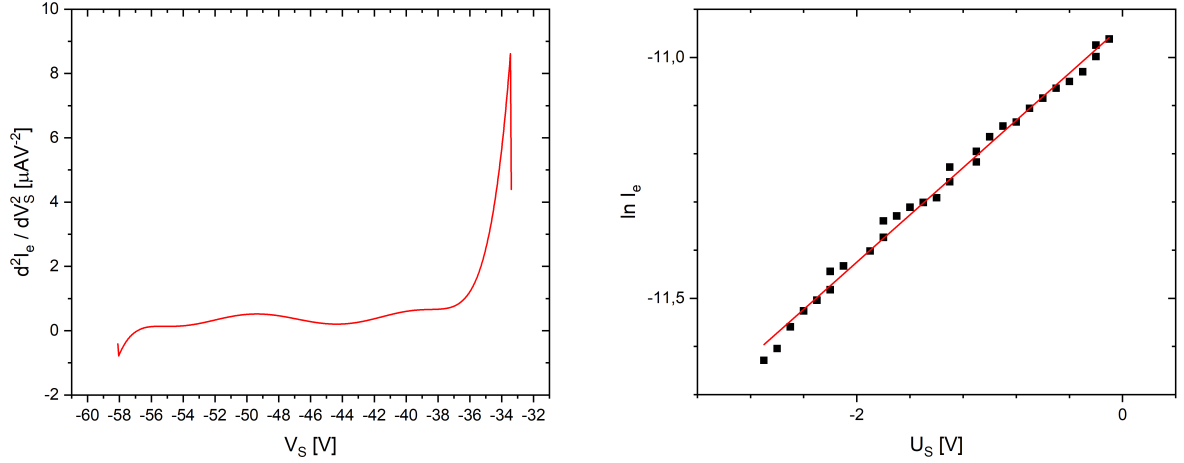
Obrázek 19: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 320$ Pa a $I_v = 40$ mA.



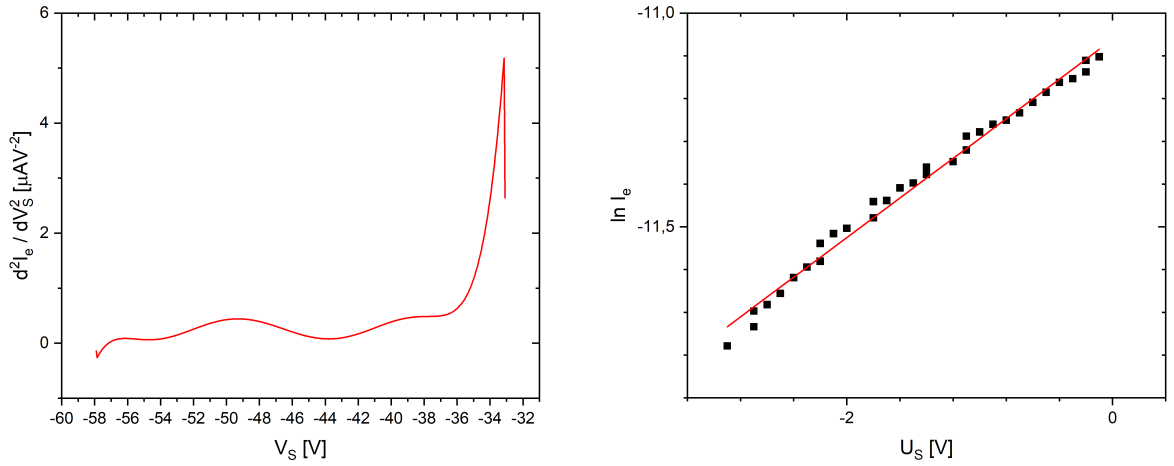
Obrázek 20: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 80$ Pa a $I_v = 40$ mA.



Obrázek 21: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 32$ Pa a $I_v = 40$ mA.



Obrázek 22: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 16$ Pa a $I_v = 40$ mA.



Obrázek 23: Stanovení potenciálu plazmatu a elektronové teploty pomocí druhé derivace, $p = 8$ Pa a $I_v = 40$ mA.

3 Závěr

V této úloze jsme se seznámili s měřením pomocí Langmuirovy jednoduché válcové sondy. Naměřili jsme osm VA charakteristik pro různé podmínky. Určili jsme plovoucí potenciál sondy, který se zvětšuje s rostoucím výbojovým proudem, při změnách tlaku za konstantního proudu nevykazoval žádný trend. Dále jsme určili potenciál plazmatu, ten je vždy větší než plovoucí potenciál a při změnách výbojového proudu a tlaku se chová obdobně jako plovoucí potenciál. Nakonec jsme získali elektronové teploty a spočítali elektronovou koncentraci. S rostoucím výbojovým proudem roste i koncentrace elektronů a jejich teplota klesá. S rostoucím tlakem jsme pozorovali stejnou závislost, tedy rostoucí koncentraci elektronů a klesající elektronovou teplotu. Při vyhodnocování jsme použili dvou metod určení potenciálu plazmatu,

starší metody průsečíku asymptot a modernější metody druhé derivace. Jejich výsledky jsou blízké.

Reference

- [1] Návod k praktiku: *Diagnostika plazmatu doutnavého výboje pomocí elektrostatických sond: jednoduchá sonda.*