

Záznam z měření

Jiří Malinák

4. března 2021

1 Motivace

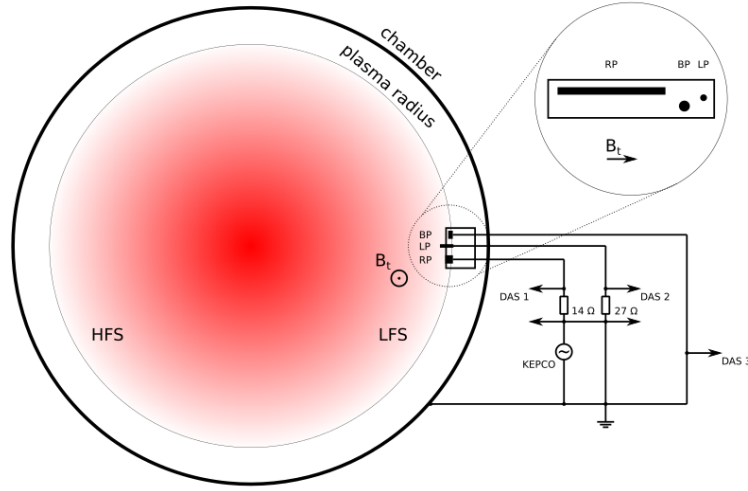
V předchozím měření byla určena poloha nulového náklonu hlavičky rail sondy. Snahou je změřit voltampérovou charakteristiku pro tento nulový úhel a následně určit další voltampérové charakteristiky pro větší úhly. Cílem tohoto měření je předběžně nalézt úhel, pro který se ztrácí sheet expansion efekt a voltampérové charakteristiky rail a Langmuirovy sondy se stávají identické. Dalším cílem tohoto měření je provést test elektroniky.

2 Postup měření

Na rail a Langmuirovu sondu byl připojen vzdáleně řízený napěťový zdroj, který poskytoval napětí mezi 0 V až 100 V. Pro dosažení záporných hodnot napětí bylo třeba vždy změnit polaritu zdroje. Ball-pen sonda se po celou dobu měření ponechala v režimu měření plovoucího potenciálu. Proud na Langmuirově, ball-pen a rail sondě byl měřen datovým sběrem Papouch. Pro Langmuirovu sondu bylo měření proudu provedeno přes odpor $R_{lp} = 27 \Omega$, pro měření na rail sondě byl použit odpor $R_{rp} = 14 \Omega$. (viz Obr. 2).

Měření voltampérových charakteristik bylo provedeno v radiální poloze $R = 85$ mm a pro mikroposuv $d_1 = 14$ mm, $d_2 = 12,5$ mm a $d_3 = 11$ mm. Na základě určené polohy nulového náklonu $d_0 = (13,6 \pm 0,7)$ mm byly přepočteny tyto mikroposuvy na úhel náklonu $\alpha_1 = 0,6^\circ$, $\alpha_2 = -2,7^\circ$ a $\alpha_3 = -6,2^\circ$. Parametry výbojů zůstaly zachovány s hodnotami: $U_{Bt} = 1200$ V, $T_{Bt} = 0 \mu\text{s}$, $U_{cd} = 450$ V, $T_{cd} = 2000 \mu\text{s}$. Byl pouze pozměněn tlak pracovního plynu na $p = 16$ mPa vodíku.

Celkově byly naměřeny tři voltampérové charakteristiky: s náklonem $\alpha_1 = 0,6^\circ$ ve výbojích číslo 36040 až 36050, s náklonem $\alpha_2 = -2,7^\circ$ ve výbojích 36051 až 36060 a s náklonem $\alpha_3 = -6,2^\circ$ ve výbojích 36061 až 36071. Všechny voltampérové charakteristiky byly naměřeny v rozmezí napětí -100 V až 20 V s rozmezím dvaceti voltů a jemnějším rozlišením v okolí 0 V.



Obr. 1: Schéma zapojení jednotlivých sond. Proud na Langmuirově, ball-pen a rail sondě byl měřen datovým sběrem Papouch. Pro Langmuirovu sondu bylo měření proudu provedeno přes odpor $R_{lp} = 27 \Omega$, pro měření na rail sondě byl použit odpor $R_{rp} = 14 \Omega$.

3 Zpracování dat

Z naměřených průběhů napětí na rezistorech byly určeny proudy na rail a Langmuirově sondě. Byly vybrány časové intervaly přes které byly vypočítány průměrné hodnoty proudů na sondách. Tyto průměrné hodnoty byly následně vyneseny do voltampérové charakteristiky.

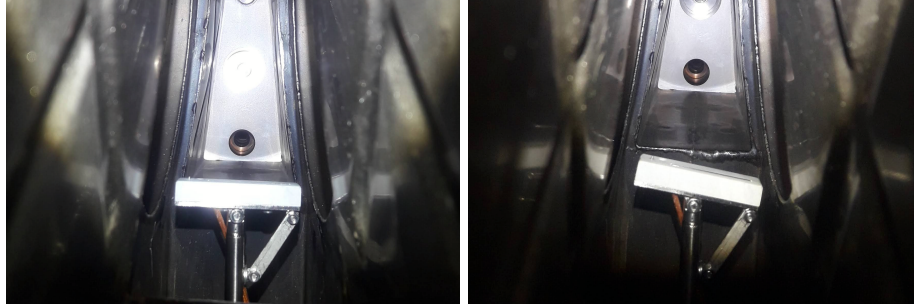
3.1 Tříparametrový fit

Voltampérová charakteristika byla proložena tříparametrovým fitem:

$$I(U) = I_{sat} \left(1 - \exp \left(\frac{U - U_{fl}}{T_e} \right) \right), \quad (1)$$

kde parametr I_{sat} má význam iontového saturovaného proudu, U_{fl} má význam plovoucího potenciálu a T_e elektronové teploty. Voltampérové charakteristiky byly následně vykresleny normované dle iontového saturovaného proudu I_{sat} . Bylo tomu učiněno proto, aby bylo možné porovnat tvary charakteristik rail a Langmuirovy sondy. Příklad voltampérové charakteristiky proložené tříparametrovým fitem pro čas 14 ms až 15 ms je v grafu Obr. 3.

Z grafu je zřetelné, že některé body již přísluší elektronové větvi voltampérové charakteristiky. Fit by měl být správně prováděn pouze pro iontovou větev voltampérové charakteristiky. Následující fity byly prováděny pouze pro body větší než trojnásobek záporné hodnoty iontového saturovaného



Obr. 2: Fotografie hlavice rail sondy před měřením 3. března 2021 (nalevo) a po měření 12. března 2021 (napravo).

proudu I_{sat} . V prvním koku byl proveden fit celé voltampérové charakteristiky. V druhém kroku byla vzata určená hodnota iontového saturovaného proudu I_{sat} a podle této hodnoty bylo vytvořeno kritérium:

$$I > -3 \cdot I_{sat}. \quad (2)$$

Příklad takového fitu pro čas 14 ms až 15 ms je v grafu Obr. 4. Dále byly touto metodou vytvořeny grafy pro časy 15 ms až 16 ms (viz Obr. 5) a 16 ms až 17 ms (viz Obr. 6).

Dále byly vykresleny všechny voltampérové charakteristiky z rail sondy do jednoho grafu Obr. 7 a ty byly následně fitovány tříparametrovým fitem. Tři naměřené charakteristiky z Langmuirovy sondy byly nakresleny a fitovány jako jedna voltampérová charakteristika. Voltampérové charakteristiky z rail sondy byly normovány projekční plochou rail sondy:

$$A = a \cdot b \cdot \sin(\alpha) = 40 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} \cdot \sin(\alpha) = 80 \text{ mm} \cdot \sin(\alpha). \quad (3)$$

Voltampérová charakteristika z Langmuirovy sondy byla normována pouze celkovou plochou sondy:

$$A = 2\pi r v + \pi r^2 = 2\pi \cdot 0,55 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} + \pi \cdot (0,55 \text{ mm})^2 = 7,86 \text{ mm}. \quad (4)$$

Vznikl tedy graf, který porovnává charakteristiky rail sondy v závislosti na náklonu s Langmuirovou sondou.

3.2 Čtyřparametrový fit

K určení sheet expansion efektu v nesaturované části voltampérové charakteristiky byl použit čtyřparametrový fit:

$$I(U) = I_{sat} \left(1 - \exp\left(\frac{U - U_{fl}}{T_e}\right) \right) + \left(\frac{\Delta I}{\Delta V}\right) (U - U_{fl}), \quad (5)$$

kde $(\frac{\Delta I}{\Delta V})$ je směrnice nekonstantní části voltampérové charakteristiky (1). Příklad takového fitu pro čas 14 ms až 15 ms je v grafu Obr. 8. V tomto grafu je plnou čarou uveden čtyřparametrový fit. Obdobně byly vytvořeny grafy pro časy 15 ms až 16 ms (viz Obr. 9) a 16 ms až 17 ms (viz Obr. 10).

Opět byly vykresleny všechny voltampérové charakteristiky rail sondy a Langmuirovy sondy do jednoho grafu Obr. 11. Charakteristiky byly normovány dle plochy 4 a 3 a proloženy čtyřparametrovým fitem.

4 Diskuze

Z naměřených a normovaných dat dle I_{sat} je zřetelné, že naměřené voltampérové charakteristiky dobře kopírují charakteristiky naměřené Langmuirovou sondou. Problematickým bodem je bod příslušící napětí na sondách 0 V. Tento bod byl pro každou charakteristiku určena dvakrát a to vždy pro odlišné polarizace napěťového zdroje. Tento bod není pro obě polarizace totožný v hodnotě proudu I , což poukazuje na problém související se změnou této polarizace. Rozdíl v hodnotách proudů se projevil ve všech tří různých sériích výbojů a nejedná se proto o známku špatné reprodukovatelnosti výbojů. Chyba nastala buď v zapojení tohoto zdroje a nebo hodnota napětí na zdroji není ve skutečnosti reálnou hodnotou napětí na sondách. Pro následující měření je nevyhnutelné přímé měření napětí na obou sondách zvláště vyhrazenou diagnostikou.

Nehledě na změnu úhlu není z grafu normovaného dle I_{sat} pozorován nijak vysoký sheath expansion efekt. Toto pozorování je podpořeno čtyřparametrovým fitem, konkrétně parametrem $(\frac{\Delta I}{\Delta V})$ vyjadřujícím sklon lineárního fitu. Hodnota tohoto sklonu je mírně vyšší pro úhel náklonu $\alpha = 0,7^\circ$.

Na druhou stranu z grafů Obr. 7 a Obr. 11, kde jsou charakteristiky normovány na plochu sondy, je sheath expansion efekt velmi dobře vidět. Hodnota J_{sat} je pro rail sondu v nejmenším úhlu dvacetkrát vyšší, než pro referenční Langmuirovu sondu. Tato hodnota J_{sat} pro rostoucí úhel náklonu klesá. Pro úhel $-6,2^\circ$ je rozdíl mezi rail a Langmuirovou sondou pouze dvojnásobný.

Tříparametrový fit se ukazuje jako nevhodný pro fitování voltampérových charakteristik flush mounted sond. Je zřejmé, že čtyřparametrový fit dokáže určitým způsobem reagovat na sheath expansion flush mounted sond, ale ani zdaleka nedokáže přesně určit hodnotu J_{sat} . Zároveň je důležité poznamenat, že I_{sat}^- klesá s rostoucím úhlem.

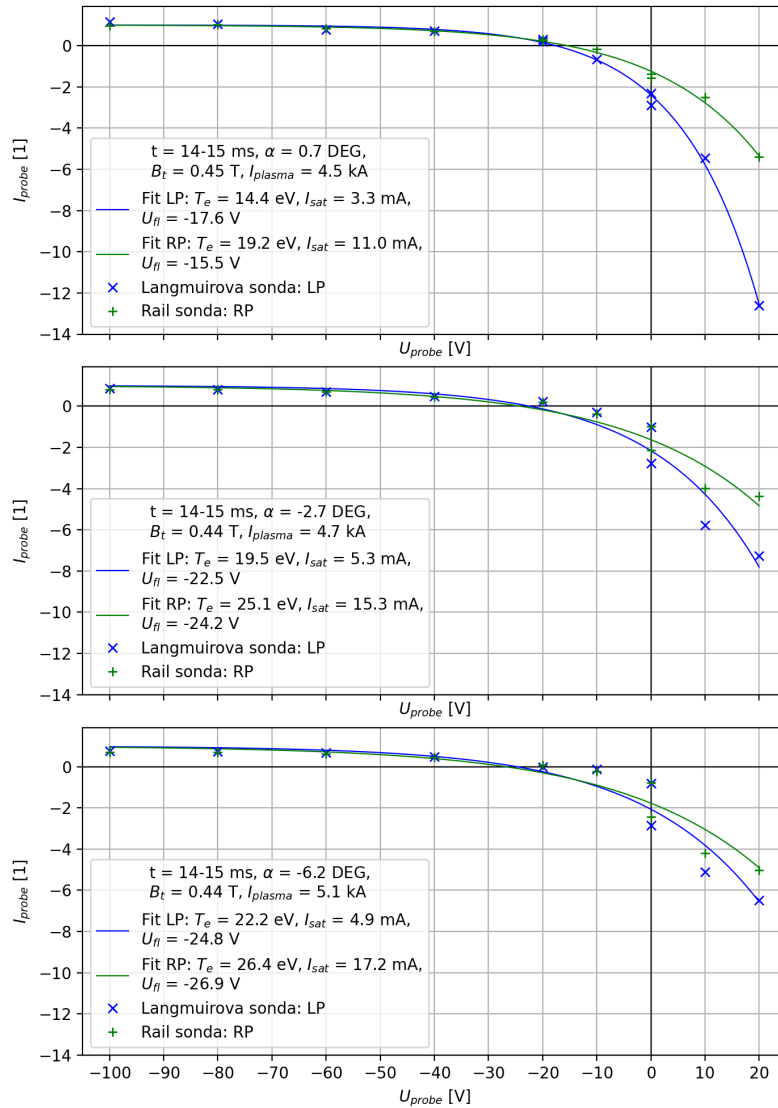
5 Závěr

V prvním měření se ověřilo, že voltampérové charakteristiky Langmuirovy a rail sondy jsou pro velké úhly nerozlišitelné, zatímco pro úhly malé je vliv sheath expansion efektu velký.

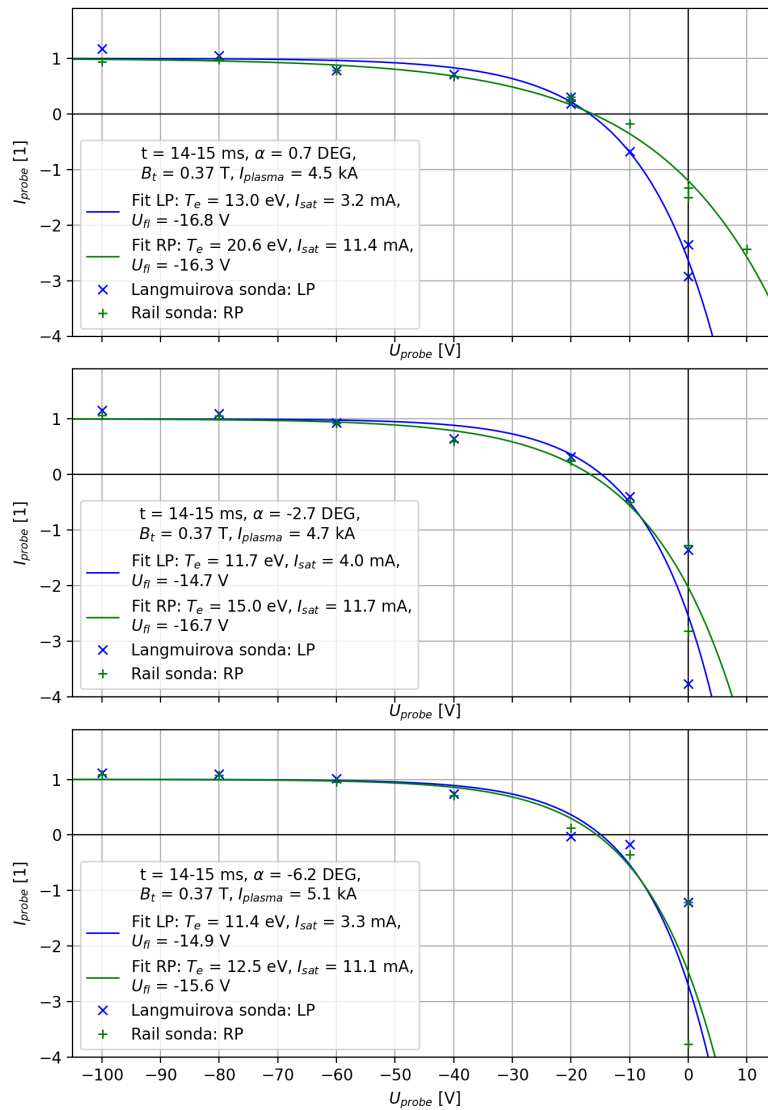
Pro další měření je nezbytné přímé měření napětí na sondách. Ideální by bylo použití metody rozmítání, která by poskytovala možnost určit voltampérové charakteristiky pro větší množství náklonů sondy.

Reference

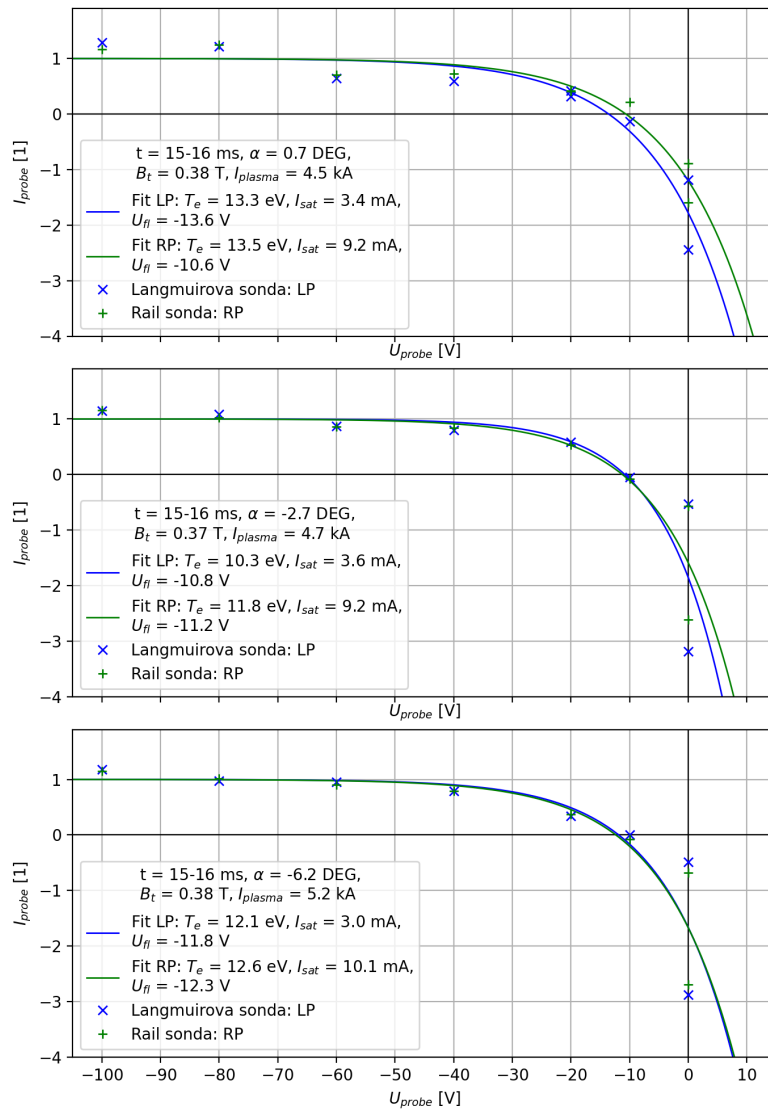
- [1] C. K. Tsui, 2018 Review of Scientific Instruments 89, 013505
- [2] A. Q. Kuang, 2018 Review of Scientific Instruments 89, 043512



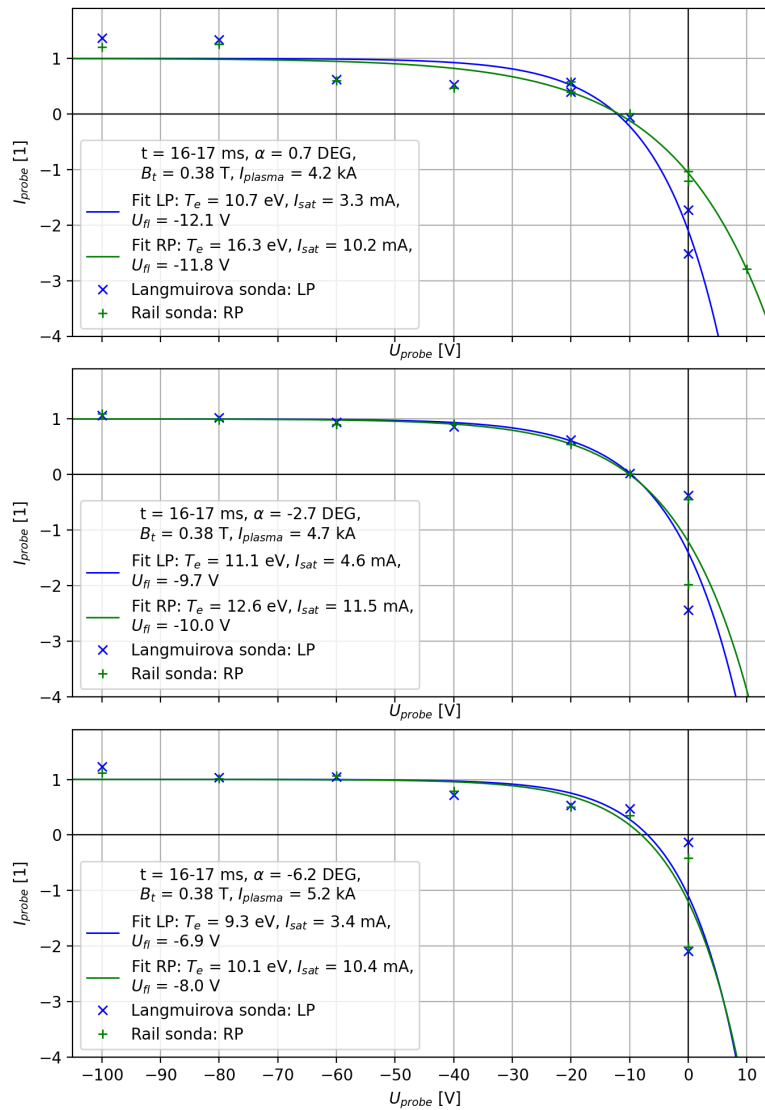
Obr. 3: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly získány metodou shot to shot a průměrovány přes čas 14 ms až 15 ms.



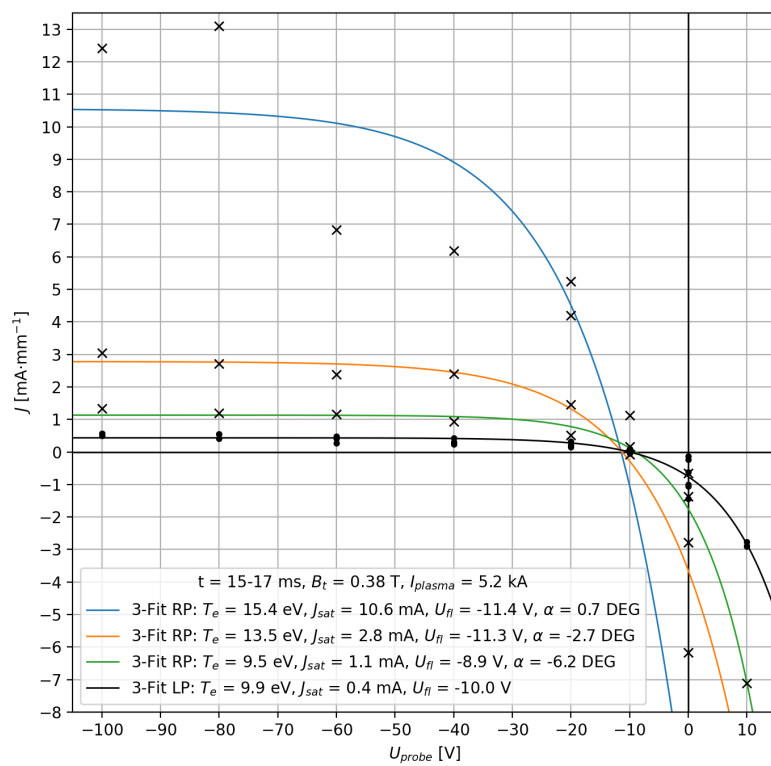
Obr. 4: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly průměrovány přes čas 14 ms až 15 ms a byl použit tříparametrový fit z 1. Fitovány byly pouze body vyhovující podmínce 2.



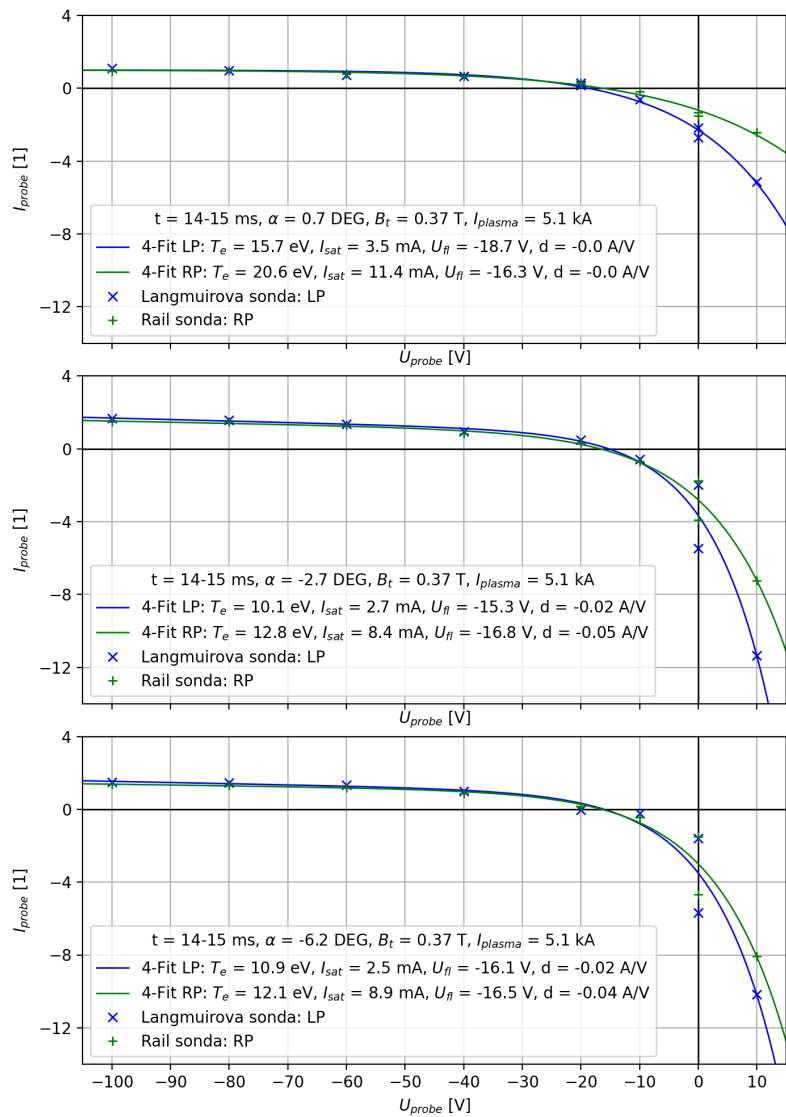
Obr. 5: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly průměrovány přes čas 15 ms až 16 ms a byl použit tříparametrový fit z 1. Fitovány byly pouze body vyhovující podmínce 2.



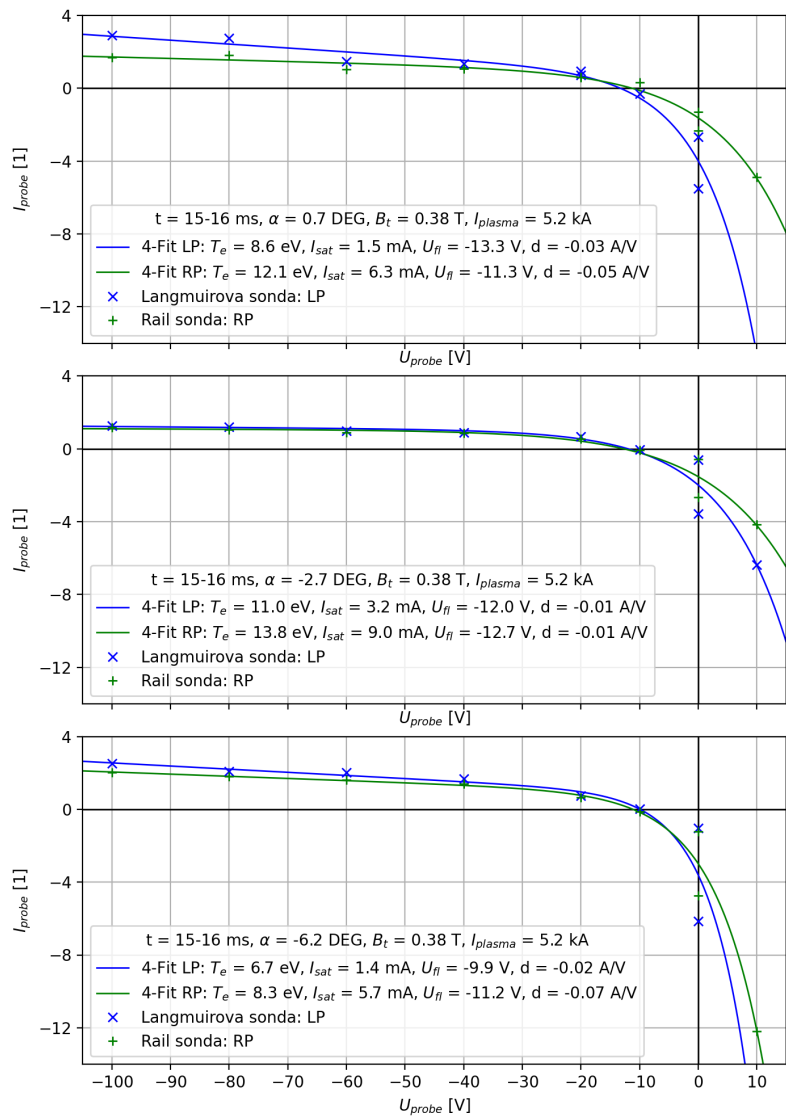
Obr. 6: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly průměrovány přes čas 16 ms až 17 ms a byl použit tříparametrový fit z 1. Fitovány byly pouze body vyhovující podmínce 2.



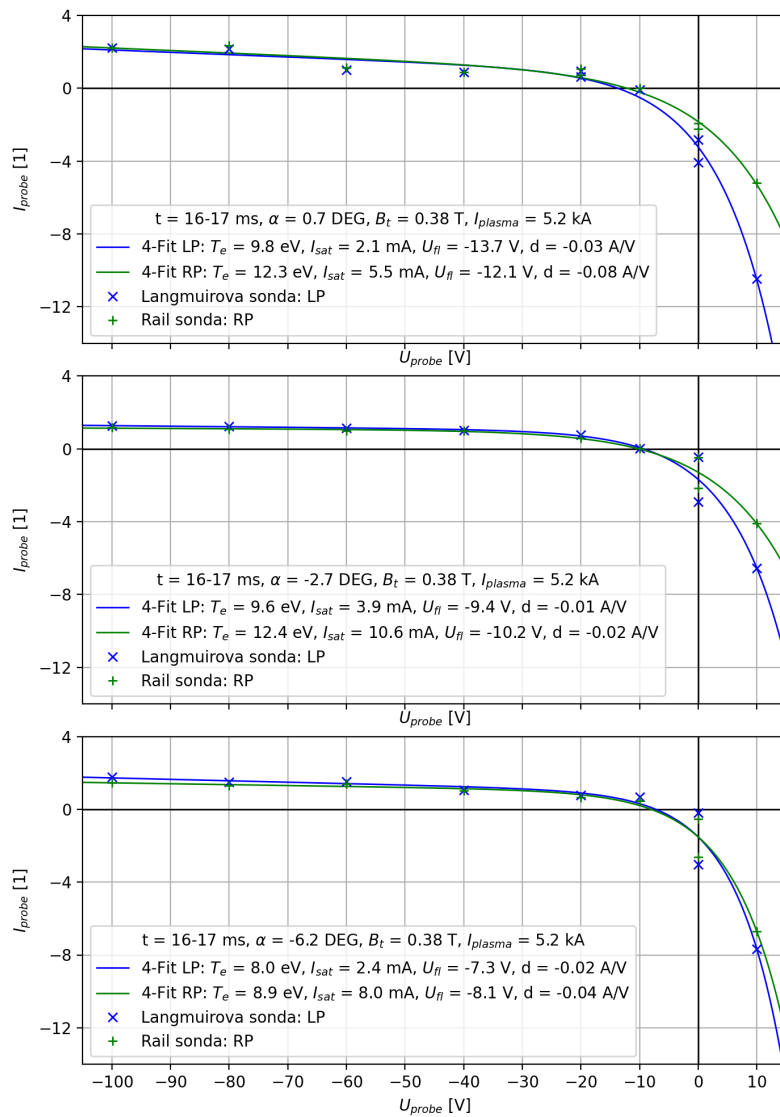
Obr. 7: Voltampérové charakteristiky Rail a langmuirovy sondy normované na plochy 4 a 3. Byl proveden tříparametrový fit.



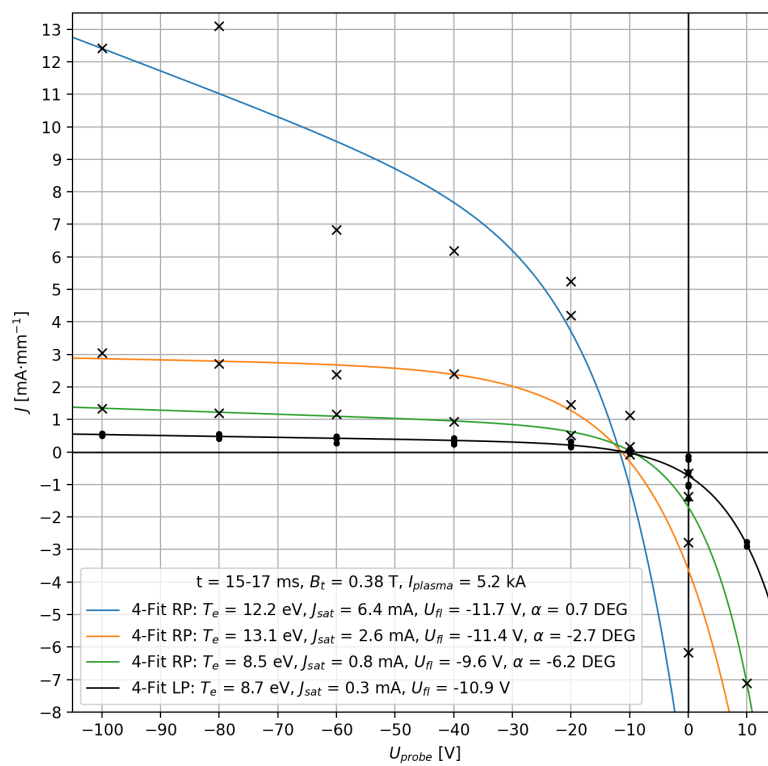
Obr. 8: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly průměrovány přes čas 14 ms až 15 ms a byl použit čtyřparametrový fit z 1. Fitovány byly pouze body vyhovující podmínce $U \leq 10$ V.



Obr. 9: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly průměrovány přes čas 15 ms až 16 ms a byl použit čtyřparametrový fit z 1. Fitovány byly pouze body vyhovující podmínce $U \leq 10$ V.



Obr. 10: Srovnání šesti voltampérových charakteristik z rail (zelená) a Langmuirovy (modrá) sondy pro tři různé úhly α . Voltampérové charakteristiky byly průměrovány přes čas 16 ms až 17 ms a byl použit čtyřparametrový fit z 1. Fitovány byly pouze body vyhovující podmínce $U \leq 10$ V.



Obr. 11: Voltampérové charakteristiky Rail a langmuirovy sondy normované na plochy 4 a 3. Byl proveden čtyřparametrový fit.