

Základy diagnostiky vysokoteplotního plazmatu na tokamaku GOLEM

M. Bartaloš[†], A. Míchal^{††}, D. Něnička[‡], P. Sluka^{‡‡}

[†]Křesťanské gymnázium, Praha, ^{††}Gymnázium Jiřího z Poděbrad,

[‡]Gymnázium Rožnov pod Radhoštěm,

^{‡‡}Gymnázium Mikulášské náměstí, Plzeň

[†]matyas.bartalos@gmail.com , ^{††}michal.adam2906@gmail.com,

[‡]dejv.1001@email.cz, ^{‡‡}petr@sluka.cz

21. 6. 2022

Abstrakt

Náš miniprojekt měl za cíl seznámit se s principem a diagnostikou tokamaku GOLEM na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Po teoretickém úvodu jsme se pokusili diagnostikovat vysokoteplotní plazma a určit jeho teplotu. Provedli jsme několik výstřelů na tokamaku GOLEM, z nichž jsme získali potřebná data k určení jeho teploty.

1 Úvod

V posledních letech se energetické nároky lidstva razantně zvyšují. Slučováním vodíkových atomů můžeme získat velké množství energie, avšak aby mohlo dojít k srážce jader je nutno překonat odpudivé síly mezi nimi. Tuto sílu překonáme urychlením částic, čehož docílíme zahřátím. Za vysoké teploty potom vzniká ionizovaný plyn, alias plazma, toto není ale za standardních podmínek možné, proto používáme tokamak.

2 Princip tokamaku

Tokamak je zařízení schopné krátkodobě vytvořit vysokoteplotní plazma. Na jeho principu by v budoucnu mohla fungovat termonukleární elektrárna. Plazma je ve vakuové komoře o tvaru toroidu udržováno pomocí cívek, které vytváří magnetické pole a zahříváno je průtokem proudu indukovaného transformátorem. Plazma má ale tak vysokou teplotu, že ho nelze změřit kontaktními metodami, proto musíme teplotu změřit nepřímou.

3 Metody diagnostiky

Teplotu plazmatu lze bezkontaktně určit pomocí měření elektromagnetického pole a určení odporu plazmatu. K tomu nám slouží následující měřící diagnostiky (viz. Obr. 1):

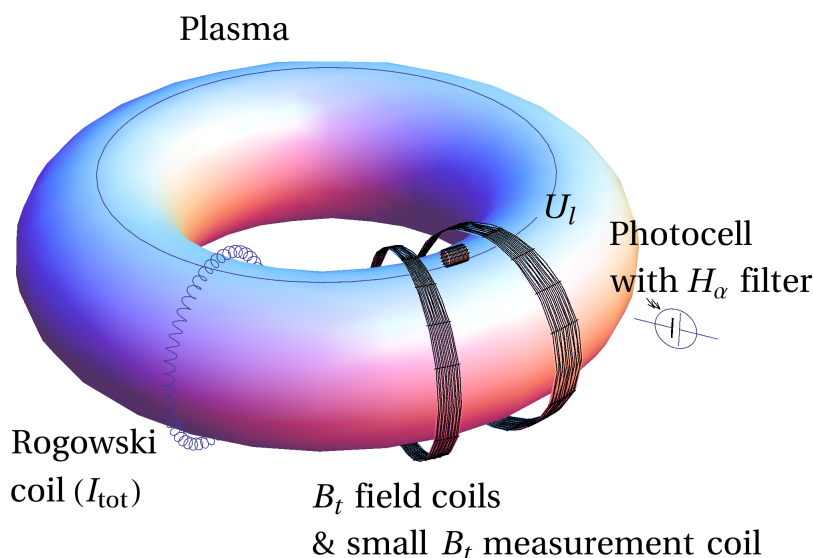
Jednozávitová cívka omotaná po horním obvodu komory měří napětí na závit U_{loop} indukované na sekundárním vinutí transformátoru.

Rogowského páska je vodič, kolem kterého je omotaná cívka. Umisťuje se kolem příčného řezu komory a měří se pomocí ní napětí vyvolané změnou proudu v plazmatu. Když změřené napětí zintegrujeme, získáme celkový proud protékající komorou a plazmatem I_{all} . Abychom získali pouze proud protékající plazmatem I_p , musíme odečíst proud protékající komorou $I_k = \frac{U_1}{R_k}$, kde R_k je odpor komory ($R_k = 0,0097 \Omega$), I_p vypočteme jako

$$I_p = I_{all} - I_k = C_{Rog} \cdot \int U_{Rog} dt - \frac{U_1}{R_k}.$$

B_t cívka se umisťuje mezi cívky okolo komory co nejbližší ke komoře. Slouží k měření toroidálního magnetického pole.

Fotodioda slouží k identifikaci plazmatu v komoře. Její snímání nám umožňuje zjistit, jak dlouho plazma v komoře vydrželo.



Obrázek 1: Schéma umístění diagnostik, převzato z [2].

Jakmile známe proud protékající plazmatem (I_p) a napětí na závit (U_{loop}), můžeme podle vzorce $T_p = 0,9 \cdot \left(\frac{U_{loop}}{I_p}\right)^{-\frac{2}{3}}$ přibližně určit jeho teplotu.

Všechny komponenty jsme připojili pomocí koaxiálních kabelů k osciloskopu, který zobrazoval naměřená data v čase.

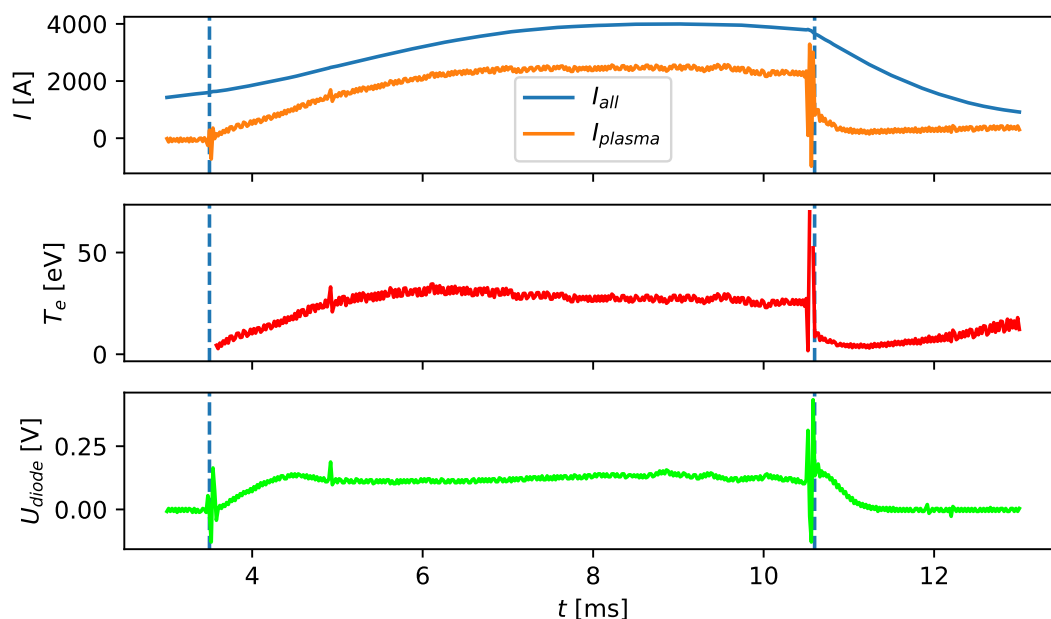
Na tokamaku lze nastavit 3 nejdůležitější parametry:

- U_{Bt} : napětí na kondenzátorech pro cívky toroidálního pole
- U_{cd} : napětí pro jádro tokamaku
- Tlak paliva: tlak vodíku uvnitř vakuové komory.

4 Výsledky

Při zkoumání jsme nastavovali: U_{Bt} : pro účely tohoto měření jsme používali nejvyšší hodnotu 1300 V; U_{cd} : tuto hodnotu jsme postupně snižovali z maximálních 700 V po 50 V; tlak paliva jsme měli stále nastavený na 30 mPa, avšak jeho skutečné hodnoty se lišily.

Obr. 2 je grafický výstup dat z výstřelu číslo #39475.



Obrázek 2: Výstřel #39475, parametry: U_{Bt} 1300 V, U_{cd} 700 V, tlak: 30 mPa.

První graf na Obr. 2 znázorňuje proud tekoucí plazmatem (I_{plasma}) a celkový proud (I_{all}). V druhém grafu je vidět průběh teploty plazmatu během výboje. Třetí graf vykresluje průběh napětí na fotodiodě, Přerušované čáry napříč vymezují čas, po který probíhal výboj.

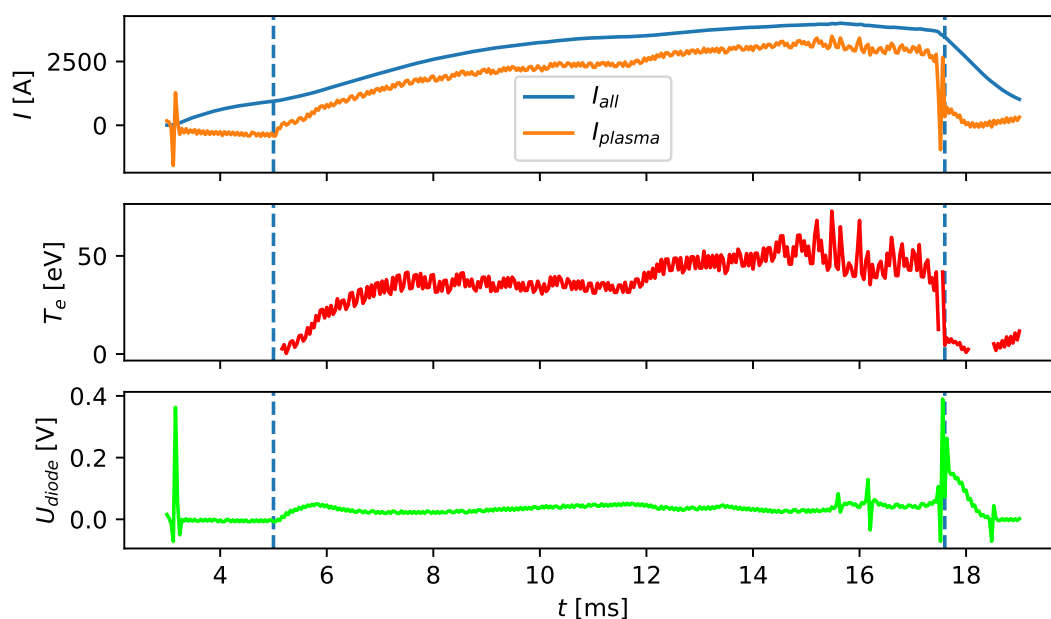
Obr. 3 je grafický výstup dat z výstřelu číslo #39500.

Na Obr. 3 můžeme vidět nejdelší námi provedený výboj. V prvním grafu je proud tekoucí plazmatem a celkový proud, ve druhém je průběh teploty plazmatu a ve třetí napětí na fotodiodě, vše v závislosti na čase. Můžeme vidět zároveň i vyšší teplotu plazmatu.

5 Diskuze

Pozorovali jsme, že změřená teplota a délka výboje se mezi jednotlivými dny miniprojektu měnila. Důvodů může být víc. Nejpravděpodobnější důvod bude kondice komory, která se četnými výstřely během dvou dní pročistila, čímž se druhý den zvedla teplota plazmatu. Z našich měření vyplývá, že při provedeném výboji hodnota tlaku v komoře a postupné snižování U_{cd} nijak výrazně neovlivňovaly teplotu plazmatu.

Vztah U_{cd} a úspěšnost vytvoření plazmatu jsme nemohli přesně určit, protože piezoven-til v některých případech nevytvořil požadovaný tlak ve vakuové komoře, čímž znemožnil úspěšný výboj.



Obrázek 3: Výstřel #39500, parametry: U_{Bt} 1300 V, U_{cd} 550 V, tlak: 30 mPa.

6 Shrnutí

Pomocí výše zmíněných postupů se nám povedlo změřit přibližnou teplotu plazmatu, která se v našich výbojích pohybovala kolem 30 eV až 50 eV, což je v přepočtu 350 000 °C až 580 000 °C.

Poděkování

Děkujeme FJFI ČVUT za umožnění práce na tokamaku GOLEM, panu Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za odborný teoretický úvod do problematiky tokamaku a Bc. Filipu Papouškovi za odborné vedení naší práce.

Reference

- [1] GOLEM Wiki contributors. Doprovodná www stránka pro úlohu Tokamak GOLEM ve Fyzikálním praktiku KF FJFI. <http://golem.fjfi.cvut.cz/KFprakt>, 2022.
- [2] GOLEM Wiki contributors. Magnetic confinement of high temperature plasma at the GOLEM tokamak. <http://golem.fjfi.cvut.cz/wiki/Education/GMinstructions/extracts/Universities/CTU.cz/PRA2/docum.pdf>, 2022.