

Měření teploty plazmatu v tokamaku GOLEM

Skupina tokamaku GOLEM

Verze: 10. března 2014

1 Pomůcky

Tokamak GOLEM s diagnostikou a datovými sběry, frekvenční generátor, napěťový zesilovač, dělič napětí 1:100, stejnosměrný zdroj 50 V, osciloskop, proměnný odpor, regulační transformátor, prstenec 16 Langmuirových sond na vertikálním manipulátoru.

2 Teoretický úvod

2.1 Plazma

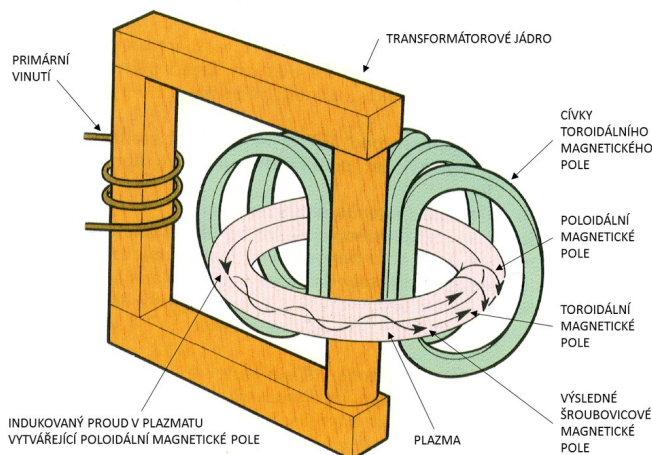
Plazma je kvazineutrální plyn vzniklý ionizací atomů neutrálního plynu. Skládá se tedy ze dvou hlavních složek, elektronů a iontů. Většina iontů pochází z pracovního plynu, např. vodíku. V reálném plazmatu je přítomné také malé, ale nezanedbatelné množství nečistot, jako je dusík, kyslík anebo uhlík. Vlastnosti plazmatu se v mnoha ohledech liší od klasického plynu, především kvůli rozdílnému typu interakcí. Zatímco v klasickém plynu dochází zpravidla k lokálním srážkám pouze dvou částic, jednotlivé části plazmatu spolu v tokamaku interagují prostřednictvím dalekodosahových magnetických a elektrických polí, takže na každou částici najednou působí velké množství jiných částic na vzdálenosti řádově až metrů. Kvazineutralitou se rozumí, že makroskopický náboj plazmatu je nulový, a kolektivní chování poukazuje na reakci plazmatu na přítomnost elektromagnetických polí jako celek. Důsledkem tohoto chování jsou unikátní vlastnosti plazmatu, z nichž mnoho je stále ne úplně pochopeno a jsou součástí intenzivního vědeckého výzkumu.

2.2 Tokamak

Typickým zařízením na generaci a studium vysokoteplotního plazmatu je *tokamak* (Obr. 1). Jde o transformátor, jehož jediným sekundárním závitem (nakrátko) je vysokoteplotní - a tedy dobře vodivé - plazma. Plazma je uzavřeno ve vakuové nádobě tvaru toroidu, na které je navinuta cívka vytvářející prstencové (toroidální) magnetické pole. Základní princip fungování tokamaku je založen na aplikaci Maxwellových rovnic v integrálním tvaru, viz např. Štoll ([10]).¹ Proud I_{PC}^2 v primáru transformátoru generuje magnetické pole \mathbf{B}_{transf} , resp. magnetický indukční tok Φ_{transf} a ten je za pomoci železného jádra vyveden a koncentrován do středu toroidu jako Φ_{tor} . Pokud se proud I_{PC} mění, bude se také měnit magnetický indukční tok Φ_{tor} ve středu toroidu a dle Faradayova zákona dá vzniknout elektromotorickému napětí \mathcal{E}^{ind} , resp. toroidálnímu elektrickému poli \mathbf{E}_t (na obrázku ve směru černé šipky uprostřed):

$$\mathcal{E}^{ind} = \oint_{l_{tor}} \mathbf{E}_t \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_{tor}}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_{S_{tor}} \mathbf{B}_{tor} \cdot d\mathbf{S}. \quad (1)$$

Při dosažení jeho dostatečné intenzity dojde k průrazu velmi řídkého pracovního plynu do plazmatu, což je lavinový proces s kladnou zpětnou vazbou: s rostoucím proudem plazmatu I_p , případně příslušnou proudovou hustotou \mathbf{j}_p , roste dle Joule-Lenzova zákona teplota, čímž se zlepšuje vodivost plazmatu a dále narůstá proud I_p až do řádů $\sim 10^3 - 10^7$ A. Dynamickou rovnováhu nakonec ustaví rostoucí ztráty tepla. Během výboje je plazma udržováno



Obrázek 1: Základní schéma tokamaku. Převzato z ([3]).

¹Zbytek této pasáže je spíše pro potěchu ducha a není nezbytný pro potřeby splnění této úlohy.

²PC znamená Primary Coils.

v centru komory (plazma se nesmí komory dotýkat) Lorentzovou silou $\mathbf{j}_p \times \mathbf{B}$. Požadovaná (šroubovicová) stabilní konfigurace magnetického pole $\mathbf{B} = \mathbf{B}_p + \mathbf{B}_t$ vzniká kombinací poloidálního³ magnetického pole \mathbf{B}_p vytvářeného proudem plazmatem I_p a toroidálního pole vytvářeného soustavou N vnějších cívek. Tyto cívky jsou v pravidelných rozestupech namotány na toroidální komoru a tvoří tak prstencově svinutý solenoid o poloměru R_0 . Proud I_{TFC} ⁴ vedený v cívkách vytváří podle Ampérova zákona toroidální magnetické pole \mathbf{B}_t :

$$\oint_{l_{tor}} \mathbf{B}_t \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{TFC} \rightarrow B_t = \frac{\mu_0 N I_{TFC}}{2\pi R_0}. \quad (2)$$

Na nabitě částice plazmatu - ionty a elektrony - tato Lorentzova síla působí tak, že zakřivuje jejich trajektorie do šroubovic okolo magnetických siločar (viz například úloha praktika KF FJFI *Měrný náboj elektronu* ([4])) a zároveň působí proti kinetickému tlaku horkého plazmatu magnetickým tlakem $\sim B^2/2\mu_0$, čímž udržuje horké plazma mimo kontakt s komorou reaktoru.

2.3 Teorie vodivosti plazmatu

Elektrické pole generované akcí transformátoru podél výbojky (*komory*) urychluje nabitě částice silou $\vec{F}_E = q\vec{E}$. Dle klasické teorie vodivosti (viz základní kurz fyziky [10]) jsou částice zároveň zpomalovány vlivem vzájemných srážek tzv. *Langvínovou silou*

$$\vec{F}_L = -m\nu\vec{u},$$

která je úměrná jejich rychlosti \vec{u} a frekvenci ν , se kterou se srážejí mezi sebou. Obě tyto síly jsou pak ve vodiči v rovnováze

$$\vec{F}_e + \vec{F}_L = 0,$$

takže rychlost nabitě částice je z hlediska středování v čase konstantní a rovná hodnotě

$$\vec{u} = \frac{q\vec{E}}{m\nu}. \quad (3)$$

V termálním plazmatu je hustota elektrického proudu \vec{j} dána především elektrony:⁵

$$\vec{j} \approx -n_e e \vec{u}_e = -\frac{n_e e^2}{m_e \nu_e} \vec{E}.$$

Veličina n_e zde značí hustotu elektronů (jejich počet v m^3). Dle *Ohmova zákona* (neplést s Ohmovým *vztahem* mezi odporem, napětím a proudem) navíc platí

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (4)$$

takže vodivost plazmatu σ je celkem

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \nu_e}.$$

Řešením kinetické Fokker-Planckovy rovnice pro elektronovou rozdělovací funkci, viz ([2]), je možno odvodit nejenom přesný tvar pro vodivost plazmatu (tzv. *Spitzerovu vodivost*) jako

$$\sigma_S = \frac{1}{0,51} \frac{n_e e^2}{m_e \nu_e},$$

ale především získat vyjádření srážkové frekvence:

$$\nu_e = \frac{1}{3(2\pi)^{3/2}} \frac{Z_{\text{eff}} n_e e^4 \ln \Lambda}{\epsilon_0^2 \sqrt{m_e T_e^{3/2}}}. \quad (5)$$

Vodivost plazmatu je tudíž

$$\sigma_S = 1,9 \cdot 10^4 \frac{T_e^{3/2} [\text{eV}]}{Z_{\text{eff}} \ln \Lambda}. \quad (6)$$

Z_{eff} je zde *efektivní náboj* iontů plazmatu, pro vodíkové plazma s malým množstvím příměsí platí $Z_{\text{eff}} \approx 2,5$. Veličina Λ souvisí s aproximací rozptylu na malé úhly a se stíněním nábojů v plazmatu (více viz [2]) a platí $\ln \Lambda \approx 17$. Ve vztahu (6) tudíž efektivně vystupuje jediná proměnná, a to elektronová teplota T_e v jednotkách elektronvoltů.⁶ Je vidět, že vodivost plazmatu s teplotou roste (na rozdíl od kovů, kde klesá) a že čisté vodíkové plazma překročí vodivost mědi o pokojové teplotě při hodnotě $T_e \approx 1,4$ keV.⁷

³okolo plazmatického sloupce/vlákna

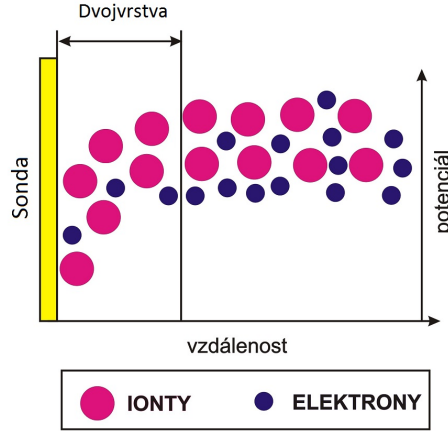
⁴TFC jako Toroidal Field Coils

⁵Příspěvek iontů je přibližně o 2 řády nižší a tedy zanedbatelný.

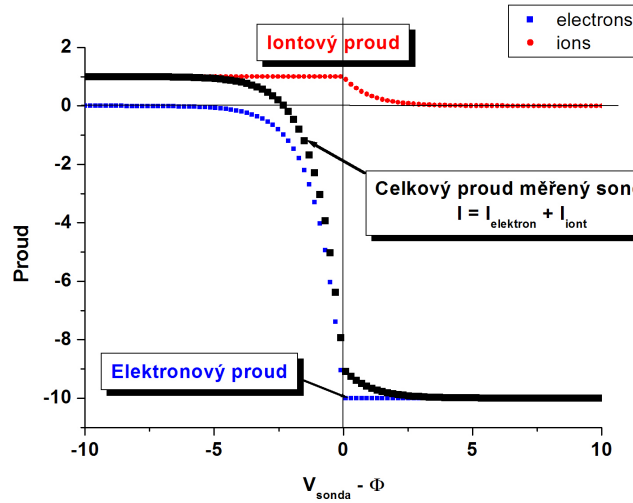
⁶Mezi teplotami platí převodný vztah 1 eV \approx 11600 K.

⁷Přibližně teplota jádra Slunce a zároveň 1/10 optimální teploty na zažehnutí D-T fúze.

2.4 Dvojvrstva a sondová měření lokální T_e



Obrázek 2: Elektrická dvojvrstva v okolí plovoucí sondy [8].



Obrázek 3: Volt-ampérová charakteristika Langmuirovy sondy v plazmatu [8].

Není-li plazma příliš horké, tzn. lze-li do něj aspoň na krátký okamžik zasunout malou sondu, možno lokální T_e měřit tzv. *Langmuirovou sondou*. V podstatě se jedná o kus vodiče vnořeného do plazmatu. Protože tepelná rychlost $v_T = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ je pro elektrony o dva řády vyšší než pro ionty, dopadne jich za jednotku času na nenabitou sondu víc. Tím se sonda nabije záporně a vzniklý náboj zamezuje dalšímu dopadu pomalejších elektronů a přitahuje okolní ionty. Záhy se na sondě ustálí dynamická rovnováha (záporného) náboje a kolem sondy se utvoří tzv. *plazmová dvojvrstva* (viz Obr. 2). Díky ní bude vodič v plazmatu vůči komoře na tzv. *plovoucím potenciálu* U_{fl} , který představuje jistý mezistupeň mezi nulovým elektrickým potenciálem komory a nenulovým potenciálem plazmatu ϕ , $0 < U_{fl} < \phi$.

Když sonda nebude plovoucí, nýbrž držena na předdefinovaném potenciálu U (buď uzemněním vůči komoře nebo stejnosměrným zdrojem napětí), platí:

- Všechn náboj dopadající na sondu za jednotku času bude odveden, tj. přes sondu bude téct elektrický proud.
- Jestliže $U < \phi$, pro hustotu elektronů v těsné blízkosti sondy platí $n_e = n_{e0} \exp\left(-e \frac{\phi - U}{kT_e}\right)$. Hustota iontů se nezmění, tj. $n_i = n_{i0}$.
- Pro $U = U_{fl}$ bude sonda za jednotku času sbírat stejný kladný i záporný náboj a tudíž výsledný proud bude nulový.
- Pro $U = \phi$ se dvojvrstva nevytvoří ani v těsné blízkosti sondy.
- Jestliže $U > \phi$, vzniklá dvojvrstva bude odpuzovat ionty a přitahovat elektrony. Pro hustoty bude platit $n_i = n_{i0} \exp\left(-Q \frac{U - \phi}{kT_e}\right)$ a $n_e = n_{e0}$ (obecně se pro zjednodušení předpokládá že $T_i = T_e$).

Jelikož pro složky proudů platí $I_e \sim n_e$ a $I_i \sim n_i$, volt-ampérová (V-A) charakteristika Langmuirovy sondy v plazmatu bude mít průběh podle Obr. 3.

Na definičním oboru $U < \phi$ (levé straně grafu na obr. 3) tedy platí:

$$I_i = I_{i0}, \quad I_e = I_{e0} \exp\left(-e \frac{\phi - U}{kT_e}\right).$$

Pro $U \ll \phi$ je proud ze sondy dán výhradně ionty a nazývá se *iontový nasycený proud*.⁸ Jelikož pro $U = U_{fl}$ platí $I_e + I_i = 0$, přičemž zároveň $U_{fl} < \phi$, tak:

$$\begin{aligned} I_{i0} &= -I_{e0} \exp\left(-e \frac{\phi - U_{fl}}{kT_e}\right), \\ \rightarrow -I_{i0} \exp\left(e \frac{\phi - U_{fl}}{kT_e}\right) &= I_{e0}. \\ \rightarrow I = I_i + I_e &= I_{i0} - I_{i0} \exp\left(e \frac{U - U_{fl}}{kT_e}\right), \\ \rightarrow I &= I_{i0} \left(1 - \exp\left(e \frac{U - U_{fl}}{kT_e}\right)\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Všimněte si, že závislost na neznámém ϕ byla nahrazena závislostí na volně nastavitelném U . Proměřením reprezentativní části V-A charakteristiky pro $U < \phi$ je možno určit elektronovou teplotu plazmatu T_e v místě sondy.

3 Experimentální uspořádání a postup měření

3.1 Tokamak GOLEM - technologické schéma

Minimalistickým cílem tohoto zařízení je současná generace plazmatu s proudem $I_p \sim 10^3$ A za účelem jeho ohřevu a toroidálního magnetického pole $B_t \sim 3 \cdot 10^{-1}$ T za účelem jeho udržení. K tomuto účelu se na tokamaku GOLEM před výbojem po jistou dobu nabíjí 2 kondenzátorové baterie (C_B a C_{CD})⁹ a současně se plní komora pracovním plynem - vodíkem. Takto uložená energie v kondenzátorech se impulzně během několika desítek milisekund vybijí proudem I_{PC} do cívek primáru transformátorového jádra generující toroidální elektrické pole \mathbf{E}_t a dále proudem I_{TFC} do 28 cívek generace toroidálního magnetického pole \mathbf{B}_t . Takto se vytvoří potřebná, pro tokamak charakteristická (viz obr. 1) konfigurace elektromagnetického pole \mathbf{E}_t & \mathbf{B} , v jejímž působení se může zažehnout a po nějakou dobu udržet plazmatický výboj. Schéma celého experimentu a jeho popis včetně nastavení a doporučených ovládacích hodnot jsou na obrázku 4 a v tabulce 2.

Velký poloměr komory	$R_0 = 0,4 \text{ m}$
Malý poloměr komory	$r_0 = 0,1 \text{ m}$
Poloměr plazmatu (limiterový)	$a = 0,085 \text{ m}$
Toroidální magnetické pole	$B_t \approx 0,3 \text{ T}$
Počet cívek generujících B_t	$N = 28$
Toroidální magnetické pole	$B_t \approx 0,3 \text{ T}$
Proud plazmatem	$I_p \approx 1 \text{ kA}$
Délka výboje	$\tau \approx 10 \text{ ms}$
Centrální elektronová teplota	$T_e \approx 40 \text{ eV}$

Tabulka 1: Základní parametry tokamaku GOLEM.

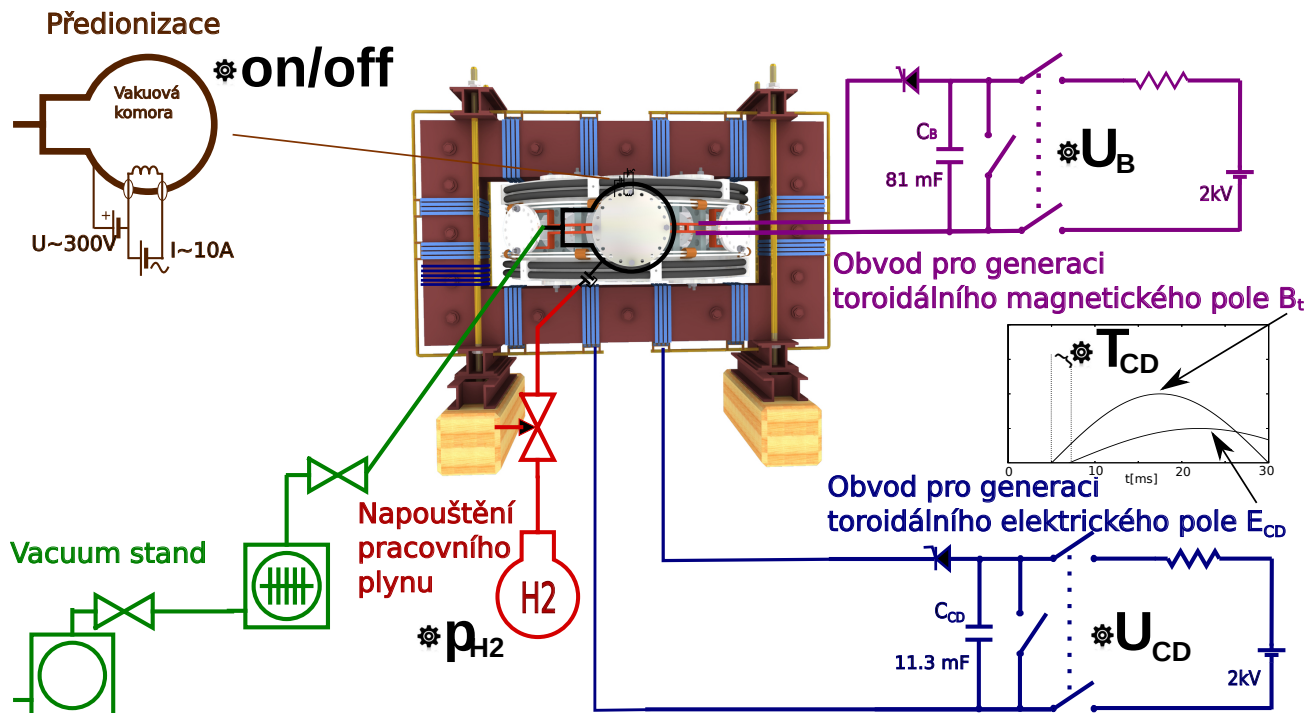
3.2 Tokamak GOLEM - základní diagnostika¹⁰

Nejzákladnější diagnostika plazmatu (viz Obr. 5) je založená na měření magnetických polí a magnetického toku v blízkém okolí plazmatu. Proto je každý tokamak vybaven sadami speciálních cívek, v kterých se vlivem změn magnetického pole v průběhu výboje indukuje napětí: i) Napětí na závit U_l . Jedná se o jediný závit cívky (v toroidálním směru) umístěný po obvodu komory. Tato cívka stejně jako komora představuje sekundár transformátoru a indukuje se na ní proto stejné napětí jako na komoře. ii) Magnetické pole B_t . Na malé cívce umístěné na komoře se indukuje napětí vlivem změny toku toroidálního magnetického pole. Samotné magnetické pole je dáno časovou integrací signálu. iii) Celkový proud I_{tot} (plazmatem i kovovou komorou) je měřen skrze změnu toku poloidálního magnetického pole. Jedná se o důmyslně namotanou cívku obepínající komoru v poloidálním směru, jež si vysloužila název Rogowského pásek viz ([7]). Signál je upraven stejně jako signál pro B_t . Pro získání proudu plazmatem I_p je potřeba znát elektromagnetické vlastnosti komory. Doplněním magnetických diagnostik je pak fotodioda s H_α filtrem monitorující záření plazmatu v oblasti spektra odpovídající přechodu elektronů mezi druhou a třetí energetickou hladinou vodíku $\lambda = 656,3 \text{ nm}$, viz úloha praktika KF FJFI *Balmerova série* ([1]). Časový záznam zapálení a udržení plazmatického výboje #11722

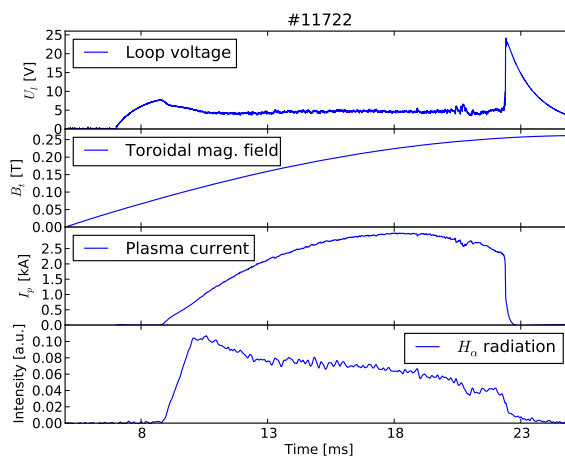
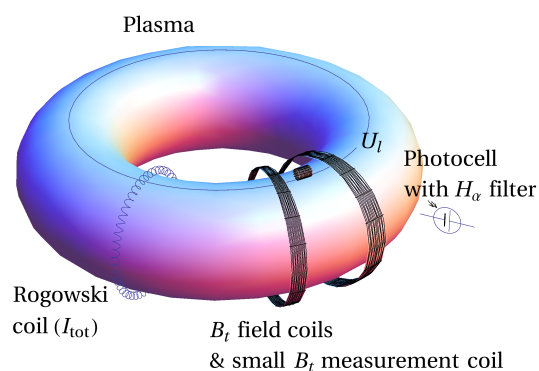
⁸Pro $U > \phi$ by platily obdobné vztahy a limitní případ $U \gg \phi$ by byl popsán jako *elektronový nasycený proud*.

⁹B ... magnetické pole, CD .. current drive - vlečení proudu

¹⁰Tato pasáž je pro získání uceleného obrázku o tokamaku GOLEM, není důležitá pro řešení tohoto praktika



Obrázek 4: Schéma tokamaku GOLEM s naznačeným průběhem vybití kondenzátorových baterií a zobrazením nastavitelných parametrů experimentu.



Obrázek 5: Základní diagnostický systém tokamaku GOLEM (vlevo schéma, vpravo získané průběhy) měřící napětí na závit U_l , magnetické pole B_t , proud plazmatem I_p a záření plazmatu ve viditelné oblasti.

Scénář provedení výboje	Technologie	Nastavení	Doporučené hodnoty
Vyčerpání komoru	Dvoustupňový vakuový systém (rotační a turbomolekulární vývěva) čerpající komoru na tlak ≈ 1 mPa.	automatické	-
Napustit pracovní plyn	Standardní průmyslová láhev s vodíkem, napojená přes počítačem řízený jehlový ventil do komory	Součet tlaku reziduálního plynu a tlaku pracovního plynu parametrem " p_{H_2} ".	$p_{H_2} \in (8, 15)$ mPa.
Zapnout předionizaci, usnadňující průraz neutrálního plynu do plazmatu	Rozžhavené wolframové vlákna, emitující elektrony prostřednictvím elektronové termoemise, viz uloha praktika KF FJFI II <i>Termoemise</i> ([9]).	nastavením volby "Preionization" na hodnotu "Bottom el. gun".	ON/OFF
Iniciovat toroidální magnetické pole B_t , pro magnetické udržení plazmatu	Elektrický obvod, tvořený kondenzátorem ($C_B = 81$ mF) připojeným přes počítačem řízený tyristor na 28 toroidálních cívek generujících magnetické pole $B_t < 0,5$ T. Jedná se tedy o LC obvod, takže časový průběh bude mít harmonický charakter, viz uloha praktika KF FJFI II <i>Rezonanční obvody</i> ([6])	Napětí na které se nabije kondenzátor " U_B " Zhruba platí, že $\max B_t \sim U_B/2$ [T,kV]	$U_B \leq 1300$ V.
Iniciovat toroidální elektrické pole E_t , pro průraz neutrálního plynu do plazmatu a jeho následný ohřev	Elektrický obvod, tvořený kondenzátorem ($C_{CD} = 11.3$ mF) připojeným přes počítačem řízený tyristor na primární cívku transformátorového jádra generující v tokamaku elektrické pole $E_t < 5$ V/m. Jedná se tedy o LC obvod, takže dtto jako u B_t	Napětí na které se nabije kondenzátor " U_{CD} " a časové zpoždění, se kterým se sepne tyristor pro E_t za tyristorem pro B_t " T_{CD} "	$U_{CD} \leq 600$ V $T_{CD} \in (0, 10)$ ms.

Tabulka 2: Scénář postupu provedení výboje na tokamaku GOLEM s odkazem na příslušnou technologii a způsob nastavení ve web rozhraní

v tokamaku GOLEM lze vidět na Obr. 5. Zapálení plazmatu lze identifikovat v čase cca 9 ms po dobu cca 14 ms. Svědčí o tom pokles napětí na závit U_L , signál z fotodiody s H_α filtrem a nárůst proudu I_p . Signál B_t představuje průběh vnějšího magnetického pole sloužícího k udržení plazmatu v komoře a signál I_p monitoruje proud plazmatem. Jednotlivé průběhy jsou dostupné na homepage individuálního výboje jednoduchým odkazem <http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/#ShotNo>, kde " $\#ShotNo$ " je nutno nahradit konkrétním pořadovým číslem výboje

3.3 Určení $\overline{T_e}$ plazmatu v tokamaku GOLEM

Srovnáním vztahů (4) a (6) dojdeme k vyjádření vodivosti plazmatu vzorcem

$$\sigma_S = 1,9 \cdot 10^4 \frac{T_e^{3/2} [\text{eV}]}{Z_{\text{eff}} \ln \Lambda} = \frac{|\vec{j}|}{|\vec{E}|}.$$

Pro průměrnou velikost proudové hustoty \vec{j} v plazmovém prstenci platí

$$\vec{j} = \frac{I_p}{\pi a^2}.$$

I_p je zde celkový proud plazmatem a $a = 8,5$ [cm] je poloměr plazmového prstence daný konstrukcí tokamaku GOLEM. Urychlovací elektrické pole lze určit změřením napětí na závit transformátoru U_{loop} :

$$|\vec{E}| = \frac{U_{loop}}{2\pi R_0} \quad (8)$$

$R_0 = 0,4$ m, tzv. *hlavní poloměr toroidu*, je opět dán konstrukčně. Průměrná elektronová teplota plazmatu je pak dána vztahem

$$\overline{T_e} [\text{eV}] = 0,214 \left(\frac{Z_{\text{eff}} I_p}{U_{loop}} \right)^{2/3}. \quad (9)$$

Teplota plazmatu přirozeně závisí na vzdálenosti r od středu plazmového prstence, $T_e = T_e(r)$: $T_e(a) = 0$ na okraji a $T_e(0) = T_{max}$ v centru. Plazma v tokamaku má přibližně *parabolický profil* teploty:

$$T_e(r) = T_{max} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)$$

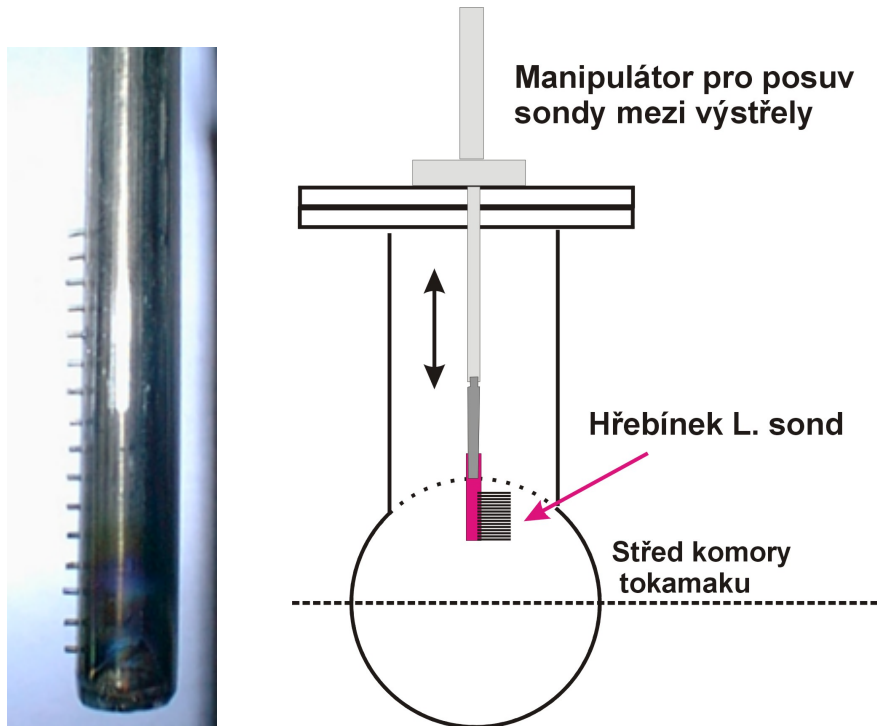
Z definice průměrné teploty

$$\overline{T_e} = \frac{1}{\pi a^2} \int_S T_e(r) dS = \frac{2}{a^2} \int_0^a r T_e(r) dr$$

je možno triviální integrací dokázat, že $T_{max} = 2\overline{T_e}$. Tudíž

$$T_e(r) = 2\overline{T_e} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \rightarrow r = a \sqrt{1 - \frac{T_e(r)}{2\overline{T_e}}}, \quad (10)$$

3.4 Rozmítaná Langmuirova sonda - měření lokální T_e



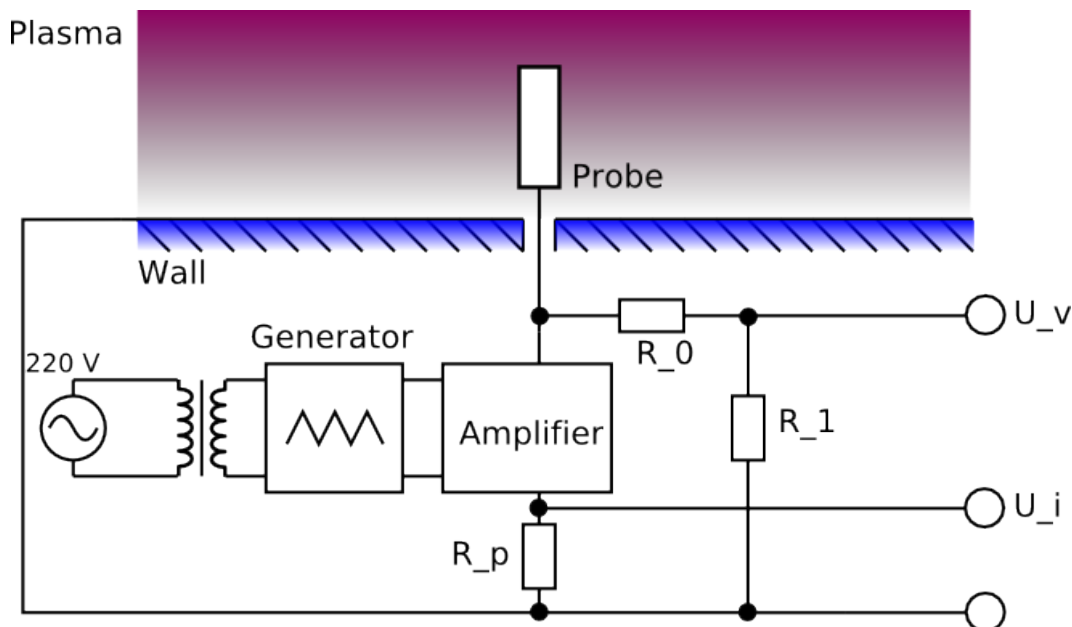
Obrázek 6: Rake probe používaná na tokamaku GOLEM k měření T_e . Hlavice se zasouvá ze spodního portu tokamaku. Obrázek byl převzat z reference [8].

Langmuirovy sondy k měření teploty na tokamaku GOLEM jsou umístěny na speciální hlavici tzv. *rake probe* (viz Obr. 6), zasunuté zespodu do komory tokamaku. Sond je celkem 16 a jsou od sebe radiálně vzdáleny 2,5 mm. V současné konfiguraci se sonda nachází na 72 mm od středu komory.

Dle vztahu (7) je V-A charakteristika sondy v plazmatu funkcí T_e . V experimentálním uspořádání se zpravidla nastavuje U , zatímco I je měřený parametr. Změna U se provádí automatizovaně a periodicky s vysokou frekvencí za pomoci frekvenčního generátoru.¹¹ Schéma experimentálního uspořádání je na Obr. 7.

- Celý obvod musí být od sítě galvanicky oddělen. Jak frekvenční generátor zajišťující rychlou a periodickou změnu napětí na sondě, tak zesilovač tohoto napětí jsou napájeny přes oddělovací trafo.
- Napětí na sondě U do vztahu (7) se měří přes dělič napětí (složen z rezistorů R_0 a R_1). Platí $U = 100 \cdot U_V$.
- Celkový proud ze sondy I pro dané napětí U se určuje standardně pomocí úbytku na rezistoru R_p , tj. $I = \frac{U_I}{R_p}$. Hodnota R_p by měla být nastavena na 22 Ω .
- Jako zemnění (referenční elektroda) slouží komora tokamaku.

¹¹Ve stacionárním plazmatu ve výbojkách lze změnu U provést manuálně pomocí nastavitelného zdroje stejnosměrného napětí - viz úkol z praktika fyziky plazmatu v magisterském bloku studia.



Obrázek 7: Schéma zapojení obvodu pro rozmítání Langmuirovy sondy k měření její V-A charakteristiky.

- Frekvenční generátor je nastaven na režim pily s dostatečnou frekvencí ($f \approx 2$ kHz). Každá půlperioda odpovídá jedné V-A charakteristice. Měření T_e má tedy časové rozlišení půlperiody frekvence generátoru.
- Naměřené hodnoty ze sond pro výstřel NNNNN jsou dostupné na url http://golem.fjfi.cvut.cz/shots/NNNNN/DAS/1011Papouch_St.ON/. Mimo U a I se sbírá ještě U_{fl} a I_{i0} ze sousedních sond.

4 Pracovní úkoly

1. Nalezněte optimální parametry pro nastavení rozmítacího zdroje, aby se proměřovala především iontově nasycená část V-A charakteristiky. Zdůvodněte vámi zvolené parametry.
2. Vykonejte sérii výbojů s různým nastavením parametrů plazmatu. Do protokolu vynesete časovou závislost U_{fl} , I_{i0} , $\overline{T_e}$, U a I pro tři z nich (t.j. 1 graf s 3 křivkami pro U_{fl} , 1 takový graf také pro I_{i0} , atd.).
3. V každém ze tří výbojů předešlého úkolu si vyhlédněte oblast s relativně stálým U_{fl} , I_{i0} a $\overline{T_e}$. Pro každý výstřel vynesete do grafu V-A charakteristiku přes tyto intervaly. Nafitujte horní část V-A charakteristiky dle vztahu (11) a určete lokální T_e . Srovnajte s $\overline{T_e}$.
4. Zvolte si pevně sadu parametrů výboje a vykonejte další sérii alespoň tří stejných výstřelů. Po každém výstřelu prohodte rozmítací obvod na sondu na jiné pozici (t.j. jiném r). Zvolte si pevně časový interval a určete lokální T_e v tomto čase metodou z úkolu 3 pro každý z těchto výbojů.
5. Vztahem (10) určete z teplot z předešlého úkolu hloubku sondy v plazmatu. Do protokolu vynesete závislost hloubky určené z teploty na poloze sondy a proložte tuto závislost vztahem

$$y = A \cdot x + B.$$

Diskutujte parametry A a B .

5 Pokyny k vypracování

1. Na frekvenčním generátoru lze volně nastavovat amplitudu pily a její DC offset (tj. hodnotu "nuly"). Aby se charakteristika dostatečně proměřila, volte amplitudu ≈ 30 V. Toho se dosahuje pomocí napěťového zesilovače. Nicméně ten nemá postačující výkon na to, aby zvládal proud tekoucí ze sondy pro $U > U_{fl}$. Proto je nutno nastavit DC offset zdroje tak, aby se během rozmítání významně nepřekračoval plovoucí potenciál. K nastavení generátoru si pomozte osciloskopem.

2. U_{fl} se podobně jako U měří přes napěťový dělič 1:100. Myslete na to při zpracování. Na fitování použijte vámi preferovaný analytický program ¹² a vztah (7) ve formě

$$y = A \left(1 - \exp \left(\frac{x - B}{C} \right) \right), \quad (11)$$

kde $y = I$ [A], $x = U$ [V], $A = I_{i0}$ [A], $B = U_{fl}$ [V] a hledaná $C = T_e$ [eV]. Jako počáteční odhad T_e použijte $\overline{T_e}$, a jako odhad U_{fl} a I_{i0} použijte měřená data.

3. Při změně rozmítané sondy nezapomeňte změnit odpovídajícím způsobem také sondy měřící U_{fl} a I_{i0} . Také pamatujte na to, že sonda č. 3 je poškozena a tudíž neměří správně.

References

- [1] *Balmerova série*. Úloha č. 4. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=193>.
- [2] P. Kulháněk. *Teorie plazmatu*. Studijní text pro FJFI ČVUT. 2008. URL: <http://www.aldebaran.cz/studium/fpla.pdf>.
- [3] G. McCracken and P. Stott. *Fúze – energie vesmíru*. MF, 2006.
- [4] *Měrný náboj elektronu*. Úloha č. 12. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=201>.
- [5] *Návod pro Gnuplot*. Doprovodné dokumenty pro Praktikum, http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/navod_gnuplot.pdf. URL: http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/navod_gnuplot.pdf.
- [6] *Rezonanční obvody*. Úloha č. 3. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=192>.
- [7] *Rogowski coil*. Wikipedia (v české verzi je špatný obrázek, používejte anglickou) http://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil.
- [8] J. Stockel. *Měření parametrů plazmatu pomocí elektrických sond na tokamaku GOLEM*. Přednáška pro U3V na FJFI ČVUT. 2011.
- [9] *Termická emise elektronů*. Úloha č. 11. Praktikum KF FJFI II, <http://praktikum.fjfi.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=200>.
- [10] I. Štoll. *Elektrina a magnetismus*. Vydavatelství skript ČVUT, Praha, 1998.

¹²Třeba Gnuplot s návodem [5] nebo Qtiplot.