

Užití mikrovlnné techniky v termojaderné fúzi

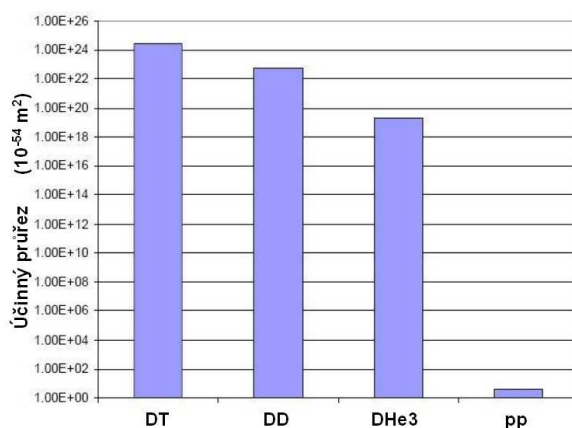
A. Křivská^{1,2}

¹ Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Česká republika

² České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra telekomunikační techniky, Česká republika

Úvod do problematiky termojaderné fúze

Termojaderná fúze je reakce, při níž dochází ke slučování jader lehkých prvků za vzniku těžších prvků a energie. Aby reakce proběhla, musí se dva atomy přiblížit velice blízko na vzdálenost srovnatelnou s jejich rozměry, kde začne převládat přitažlivá jaderná síla nad odpudivou silou elektrickou. Jádra do sebe tedy musí narazit s dostatečně vysokou energií. Na Slunci a podobně velkých hvězdách dominuje reakce proton-proton, při které se uvolňuje energie přeměnou jader vodíku na jádro helia. Na obr. 1 je znázorněn účinný průřez pro jednotlivé fúzní reakce. Účinný průřez vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou bude některá ostřelující částice ze svazku částic interagovat s částicí terče. Z tohoto obrázku vidíme, že v pozemských podmínkách může nejsnáze probíhat slučovací reakce mezi jádry dvou těžších forem vodíku, deuteria D a tritia T, označovaná zpravidla jako DT reakce.



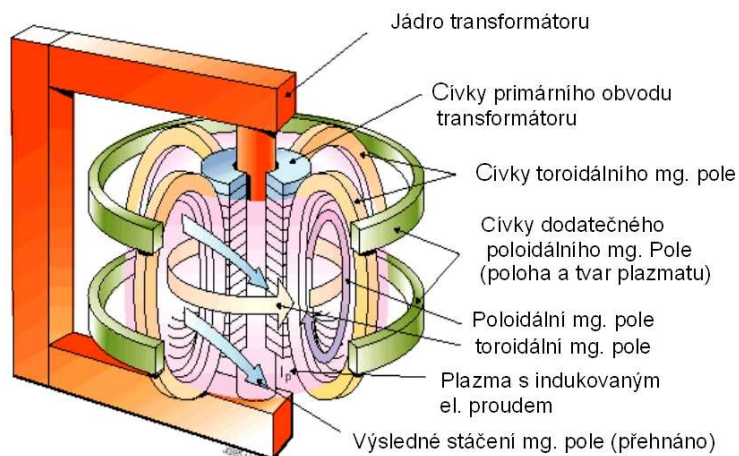
Obr. 1: Účinný průřez vybraných fúzních reakcí, (zdroj: BP,ECN).

Uskutečnění této termojaderné slučovací reakce vyžaduje v pozemských podmínkách teplotu paliva kolem 200 milionů °C. Při této teplotě se palivo nachází v plazmatickém stavu. V tomto stavu jsou, zjednodušeně řečeno, atomy rozštěpeny na jádra (kladné ionty) a elektrony. Poněvadž žádná pevná hmota nemůže teplotě milionů stupňů vzdorovat, je zřejmé, že ohřáté plazma nesmí přijít do přímého kontaktu s žádnou hmotnou stěnou reaktoru. Plazma však musí být od stěn odizolováno velmi dobře i tepelně (tj. i ztráty energie jejím vedením a sáláním musí být sníženy na minimum), jinak by došlo k rychlému ochlazení plazmatu a dosažení potřebné teploty by vyžadovalo dodávku nepříjemně velkého výkonu. Jedním ze způsobů udržení horkého plazmatu, které byly vyvinuty v pozemských podmínkách, je magnetické udržení.

1. Princip tokamaku

Nejúspěšnější zařízení užívající magnetického udržení je tokamak (viz obr. 2), který byl vyvinut v 50. letech 20. století v Moskvě. Magnetické udržení spočívá v takové konfiguraci magnetického pole, aby většina nabitých částic sledovala vhodně zakřivené magnetické siločáry, a tak nepřicházela do styku se stěnami komory, v níž se plazma vytváří. Magnetické pole šroubovicové konfigurace vzniká v tokamaku složením dvou nezávisle vytvářených magnetických polí. Sada kruhových cívek rovnoměrně rozložených podél prstencové nádoby vytváří silné udržovací magnetické pole v toroidálním směru. Elektrický proud procházející plazmatem v toroidálním směru pak indukuje slabší poloidální pole. Potřebný tvar šroubovice vzniká složením obou těchto složek.

Elektrický proud tekoucí plazmatem je v tokamacích generován na principu transformátoru. Do primárního vinutí transformátoru je přiváděn proud z vnějšího zdroje, plazma hraje v tomto transformátoru roli sekundárního závitu. Výhodou je, že transformátorem indukované napětí nejprve samo plazma vytvoří a vybuzený proud navíc dokáže plazma hned i ohřát a to až na teploty několika desítek milionů stupňů ohmickým ohřevem uvolňováním Jouleova tepla.

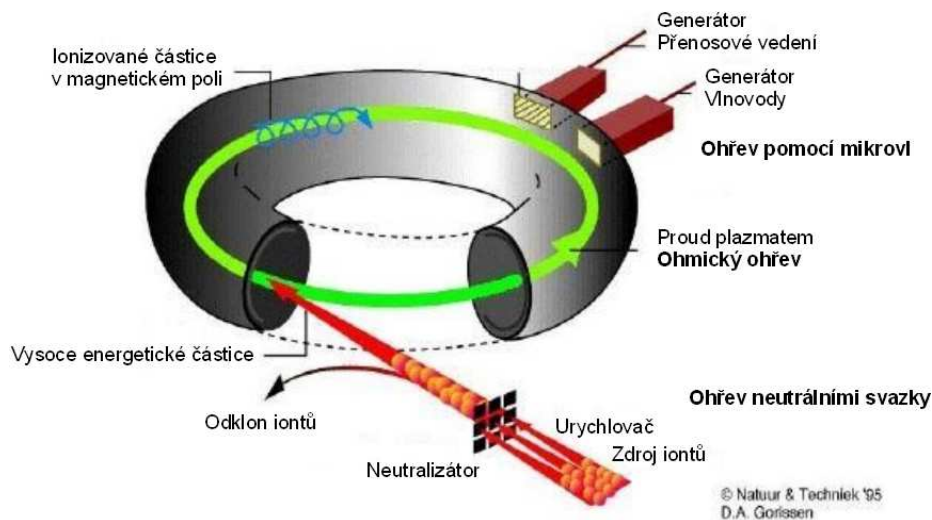


Obr. 2: Schéma tokamaku s uspořádáním magnetických polí.

K dosažení termojaderných teplot v tokamacích však samotný ohmický ohřev nestačí. Problém spočívá v tom, že elektrický odpor plazmatu s jeho teplotou silně klesá, čímž klesá i účinnost ohmického ohřevu. Maximální teplota, které lze ohmickým ohřevem reálně dosáhnout, je menší než 50 milionů °C. Z hlediska požadavků fúze, která vyžaduje teploty okolo 200 milionů °C, je to nedostačující. K dosažení termojaderné fúze musí být tedy navíc použity i další dodatečné neinduktivní metody ohřevu, jejichž účinnost s rostoucí teplotou plazmatu neklesá. Induktivní způsob generace proudu není navíc vhodný pro budoucí fúzní reaktory, které by měly pracovat nikoli v pulzním, ale ve stacionárním stavu.

2. Dodatečný ohřev plazmatu

Hlavními metodami dodatečného ohřevu je ohřev neutrálními svazky a ohřev na rádiových frekvencích, viz obr. 3. První z výše jmenovaných metod používá výkonné svazky velmi rychlých neutrálních atomů, nejčastěji deuteria, které se vsřikují do plazmatu. Tyto neutrální atomy nejsou nijak ovlivněny magnetickým polem a mohou vstupovat do plazmatu. Srážkami s částicemi plazmatu se mění na ionty, předávají energii chladnějším částicím plazmatu a zahřívají je.



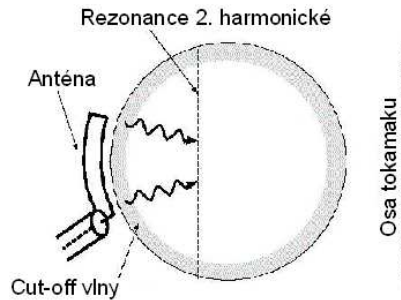
Obr. 3: Princip dodatečného ohřevu plazmatu v tokamaku.

Při druhé metodě se v plazmatu absorbuje energie rádiových vln. Vysokofrekvenční vlny se vysílají anténou umístěnou vně plazmatu. Zde je důležitý výběr konkrétních frekvencí. Nejdůležitější jsou tzv. cyklotronní frekvence, na kterých přirozeně rezonují ionty a elektrony v daném toroidálním magnetickém poli. Vlna přenese energii do středu plazmatu. Poněvadž cyklotronní frekvence částic je úměrná velikosti magnetického pole, můžeme výběrem frekvence generované vlny určit přesněji oblast ohřevu. V blízkosti rezonance (např. $\omega = \Omega_c$) dojde k absorpci, kdy se energie vlny přemění na kinetickou energii částic. V posledním kroku dojde k termalizaci - dosažení tepelné rovnováhy vzájemnou interakcí částic. Dále se budeme zabývat podrobněji jednotlivými frekvenčními oblastmi, které se pro ohřev užívají.

3. Iontová cyklotronní rezonance

V oblasti iontové cyklotronní rezonance (10–120 MHz) je mechanismus ohřevu velmi komplikovaný, poněvadž je nutno uvažovat rezonanční efekty pro všechny druhy částic. Pokud je plazma tvořeno více druhy iontů, dochází též ke vzniku dalších iont-iontových rezonancí. Z rovnic popisujících daný typ vlny můžeme odvodit vztah mezi vlnovým vektorem a úhlovou frekvencí. Tento vztah se nazývá disperzní relace. Z disperzní relace studeného plazmatu vyplývají 2 řešení. Rychlá vlna, jejíž vektor intenzity elektrického pole je kolmý na původní magnetické pole $E \perp B_0$, a pomalá vlna, jejíž vektor intenzity elektrického pole je rovnoběžný s původním magnetickým polem $E \parallel B_0$.

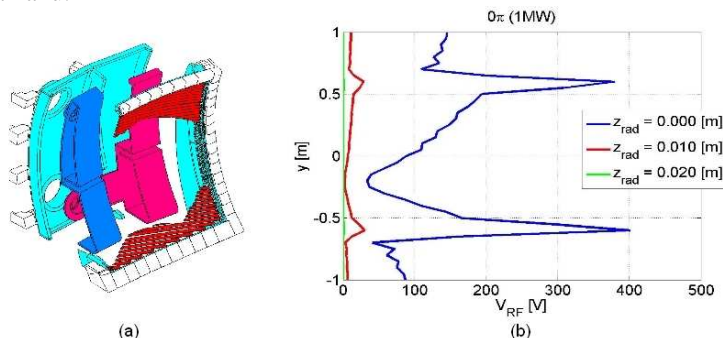
Anténa se navrhuje pro vysílání rychle vlny nejčastěji o úhlové frekvenci rovné 2. harmonické iontové cyklotronní frekvence $\omega \approx 2\Omega_{ci}$. Rychlá vlna naráží při vstupu do plazmatu na místo, kde se její index lomu blíží k nekonečnu tzv. cut off a vlna se dále nešíří. Po překonání evanescentní vrstvy, ve které je vlna exponenciálně tlumena, postupuje dále směrem do středu plazmatu, kde prochází oblastí rezonance a dochází k její absorpci.



Obr. 4: Princip ohřevu rychlou vlnou, (zdroj viz [3]).

Jedním z problémů spojených s ohřevem na iontové cyklotronních frekvencích je nárůst nečistot v plazmatu. Při činnosti antény se v kovovém pouzdře, ve němž je anténa usazena, indukují radiofrekvenční proudy. Vlivem těchto proudů vznikají v bezprostřední blízkosti antény, zejména v horní a dolní části, velmi intenzivní paralelní elektrická pole (paralelní vzhledem k vektoru magnetického pole tokamaku). Tato elektrická pole mají za následek urychlení částic před anténou. Elektronů, které jsou rychlejší než ionty, sledují magnetické siločáry a jsou odvedeny z plazmatu. Ztráta elektronů vede ke zvýšení potenciálu plazmatu na magnetických siločarách s přítomností paralelních elektrických polí. Tento potenciál vede k urychlení iontů, které narážejí na stěnu komory a vyrážejí z ní atomy. Vyrážené atomy pronikají do plazmatu a znečišťují jej. Pokud jsou stěny komory tokamaku obloženy prvkem s nízkým atomovým číslem, jako je například berylium nebo uhlík, nepředstavují nečistoty do určité míry závažný problém. To ovšem neplatí pro prvky s vysokým atomovým číslem. Na jejich ionizaci je potřeba mnohem více energie, což též vede k ochlazení plazmatu. Navíc tyto nečistoty putují do centra plazmatu, kde po zachycení elektronů silně vyzařují a opět tím způsobují ochlazení a ztrátu energie plazmatu. Zástupcem této skupiny prvků je wolfram, který se jeví jako vhodný materiál pro obklad stěn budoucích fúzních zařízení, neboť má vysokou teplotu tání (3 410 °C) a dokáže odolat velkým teplotním tokům. Pokud se má i v budoucnu uplatnit v tokamacích ohřev na iontových cyklotronních frekvencích, je potřeba zlepšit jeho kompatibilitu s materiálem stěn s vysokým atomovým číslem.

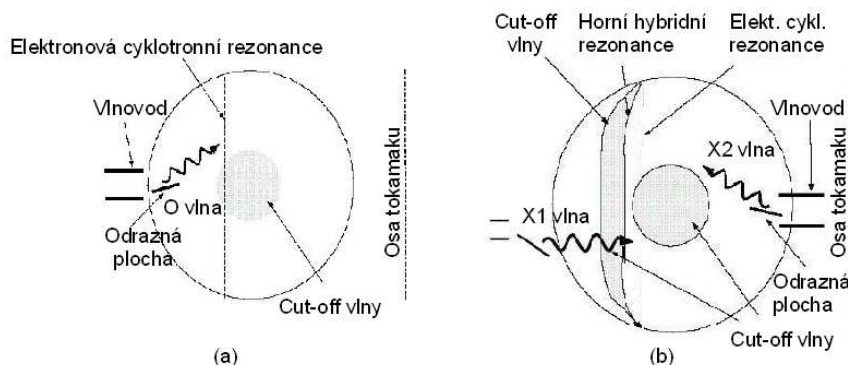
K odhadnutí velikosti parazitních elektrických polí a potenciálů urychlujících částice před anténou se užívají simulační kódy, neboť je nelze přímo měřit. Na obrázku je ukázka simulace závislosti potenciálu na vertikální souřadnici ve třech radiálních pozicích před anténou v kódu TOPICA. Z vypočítaných průběhů vyplývá, že největší hodnota potenciálu je v horní a dolní části antény. Velikost potenciálu klesá se zvyšující se radiální vzdáleností od antény. Simulační kódy pomáhají v optimalizaci antén, neboť se každá úprava antény nemůže zkoumat za činnosti tokamaku.



Obr. 5: (a) Anténa na tokamaku ASDEX Upgrade v Garchingu u Mnichova. (b) Simulace závislosti potenciálu na vertikální souřadnici ve třech radiálních pozicích před anténou v kódu TOPICA.

Elektronová cyklotronní rezonance

Vlna v oblasti elektronové cyklotronní rezonance (20–200 GHz) může z vakua pronikat volně do hustého plazmatu. Disperzní relace pro studené plazma má dvě řešení pro směr šíření kolmo k magnetickému poli tokamaku: řádnou vlnu (O) $E \parallel B_0$ a mimořádnou vlnu (X) $E \perp B_0$.



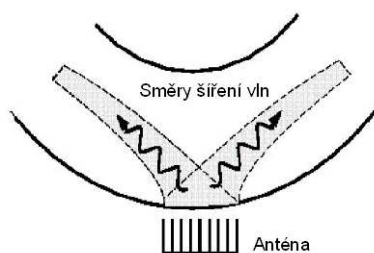
Obr. 6: (a) Užití řádné vlny a (b) mimořádné vlny pro ohřev plazmatu v oblasti elektronové cyklotronní rezonance, (zdroj viz [3]).

Vysílá-li anténa řádnou vlnu ze strany menšího magnetického pole, prochází vlna oblastí elektronové cyklotronní rezonance a přestává se šířit hlouběji v plazmatu s velkou hustotou. Při užití mimořádné vlny vysílané ze strany nízkého magnetického pole narazí vlna na cut off. Po překonání evanescentní vrstvy prochází vlna oblastí horní hybridní rezonance. Rezonance v této oblasti souvisí s elektrostatickými oscilacemi elektronů. Vratnou silou je však kromě Coulombovy síly ještě Lorentzova síla, neboť elektrony rotují kolem magnetických siločar.

Je-li vlna vysílána ze strany velkého magnetického pole, šíří se do oblasti horní hybridní rezonance a prochází na své dráze oblastí elektronové cyklotronní rezonance.

Dolnohybridní rezonance

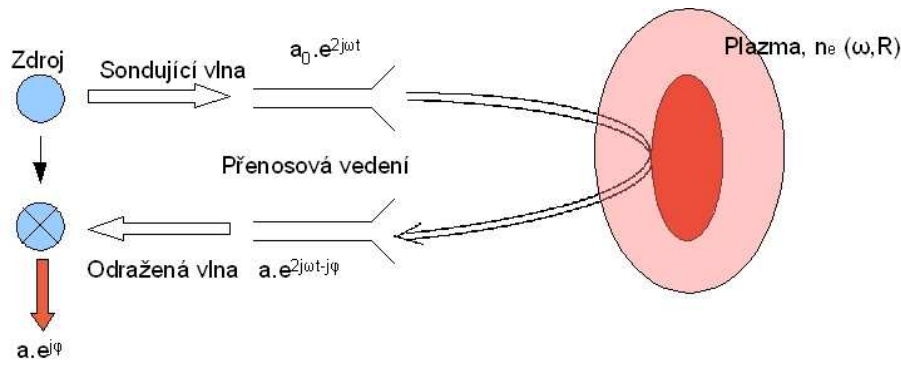
Pásmo dolnohybridní rezonance (1–10 GHz) se užívá nejčastěji pro neinduktivní generaci proudu. Rezonanční efekt na těchto frekvencích je výsledkem vzájemné kompenzace posuvných proudů iontů a elektronů. V plazmatu se dolnohybridní vlna může šířit až po překonání evanescentní vrstvy, jejíž hranice fluktuuje s fluktuacemi okrajového plazmatu. Vlna je polarizována ve směru jejího šíření a může tak účinně předávat svůj impuls elektronům pohybujícím se ve směru pole. Tím dochází ke generování elektrického proudu.



Obr. 7: Princip ohřevu dolnohybridní vlnou, (zdroj viz [3]).

Mikrovlnná diagnostika

Součástí provozu tokamaku je i celá řada diagnostických zařízení, která měří vlastnosti plazmatu. Mezi důležité diagnostické metody patří také mikrovlnná diagnostika. Mikrovlnné metody mohou být jak aktivní, tak i pasivní. Hlavním zástupcem aktivní metody je mikrovlnná reflektometrie, která se užívá k měření profilu hustoty. Tato metoda využívá závislosti indexu lomu na použité frekvenci a hustotě částic. Její princip je znázorněn na obr. 8. Do plazmatu se vyšle sondující vlna o dané frekvenci. K jejímu odrazu dochází, jakmile narazí na oblast s kritickou hustotou, ve které se nemůže šířit. Fáze odražené vlny se porovná s fází vlny sondující.



Obr. 8: Princip mikrovlnné reflektometrie, (zdroj viz [4]).

Fázový rozdíl obou vln můžeme přibližně vyjádřit vztahem

$$\varphi(\omega) \approx 4\pi\omega/c \int_{R_0}^{R_c} N(f, r) dr - \pi/2,$$

kde c je rychlost světla, ω je úhlová frekvence sondující vlny, N její index lomu, R_0 je poloha okraje plazmatu (jeho vzdálenost od osy tokamaku), R_c je poloha místa s kritickou hustotou. Z měření fázového rozdílu získáme polohu vrstvy, od které se sondující vlna odrazila $R_c(\omega)$ a z této polohy určíme hustotu plazmatu $n_e(R_c)$ v místě odrazu. Rychlým rozmitáním frekvence sondující vlny můžeme rekonstruovat hustotní profil $n_e(R)$.

Mezi pasivní diagnostické metody řadíme analýzu intenzity elektronového cyklotronního záření, které plazma emituje. Tímto způsobem můžeme určit elektronovou teplotu T . Elektronové cyklotronní záření vzniká v důsledku dostředivého urychlování elektronů při jejich rotaci kolem siločar magnetického pole. Plazma je opticky tlusté prostředí a intenzitu elektronového cyklotronního záření můžeme vyjádřit vztahem

$$I(\omega) \approx (8\pi^3 c^2)^{-1} \omega^2 T,$$

kde c je rychlost světla a ω je úhlová frekvence záření. Tu určíme ze vztahu $\omega = eB/m$, kde e je náboj elektronu, m jeho hmotnost a B je velikost magnetické indukce, která je v tokamaku nepřímo úměrná vzdálenosti od jeho osy $B \sim 1/R$. Intenzita elektronového cyklotronního záření plazmatu se měří radiometrem, na jehož výstupu se snímá napětí, které je úměrné vyzáření intenzitě elektronového cyklotronního záření. Měření se provádí na 1. nebo 2. harmonické neboť základní frekvence záření je v plazmatu pohlcena.

Použitá literatura:

- [1] MCCRACKEN, Garry; STOTT, Peter. *Fúze - energie vesmíru*. 1. Praha : Mladá fronta, 2006. 324 s.
- [2] *Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.* [online]. 2008 [cit. 2009-06-27]. Dostupné z WWW: <<http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/>>.
- [3] *Summer School* [online]. 2008 [cit. 2009-06-27]. Dostupné z WWW: <<http://iwrwww1.fzk.de/summerschool-fusion/pres2008/T3-1.pdf>>.
- [4] *Summer School* [online]. 2008 [cit. 2009-06-27]. Dostupné z WWW: <<http://iwrwww1.fzk.de/summerschool-fusion/pres2008/T3-5.pdf>>.