VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT

Doc. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc.

TECHNICKÉ APLIKACE PLAZMATU
Současný stav, trendy vývoje a výuka

PLASMA TECHNOLOGY
State of the Art, Trends and Education

TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ V OBORU
TEORETICKÁ ELEKTROTECHNIKA

VUTIUM
BRNO 2003

KLÍČOVÁ SLOVA

plazma, plazmové technologie, radiační transport energie v plazmatu, metoda parciálních charakteristik

KEYWORDS

plasma, plasma technology, radiative heat transfer in plasmas, method of partial characteristics

©2003 Vladimír Aubrecht
ISBN 80-214-2517-2
ISSN 1213-418X

Vladimír Aubrecht se narodil v roce 1964 v Třebíči. Vysokoškolské studium absolvoval v letech 1983–87 na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity, obor „Fyzikální elektronika a optika“. V rámci mezioborového studia též absolvoval vybrané přednášky na tehdejším Ústavu elektrických strojů a přístrojů FEI VUT v Brně (dnes Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT v Brně). Studium na VŠ úspěšně zakončil v červnu 1987 státní závěrečnou zkouškou a byl mu udělen titul RNDr.

Od roku 1987 je zaměstnán na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT v Brně (odborný pracovník do roku 1995, od roku 1996 jako odborný asistent, od roku 1999 jako docent).

V letech 1989–91 na tomto ústavu úspěšně absolvoval interní aspiranturu v oboru „26-02-9 Elektrické stroje a přístroje“ s disertační prací na téma „Záření plazmatu spínacího oblouku hořícího v SF_6“ a byl mu udělen titul CSc. V roce 1998 na Masarykově univerzitě v Brně úspěšně obhájil habilitační práci na téma „Radiační transport energie v plazmatu elektrického oblouku“ a byl mu udělen titul docent v oboru Fyzika plazmatu.

V roce 1992 absolvoval tříměsíční studijní pobyt na The University of Liverpool v Anglii sponzorovaný British Council. V roce 1992 půl roku pracoval v CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), Division of Applied Physics, Sydney, Austrálie, v týmu Dr. Lowke na problému přenosu energie zářením v plazmatu oblouku. V roce 1996 absolvoval v rámci programu TEMPUS 1 měsíční přednáškový pobyt na The University of Liverpool. V letech 1999–2002 absolvoval 6 krátkodobých pobytů (celkem 7 týdnů) na RWTH Aachen v rámci dvoustranné vědeckotechnické spolupráce a projektu MŠMT KONTAKT.

Do pedagogické práce se zapojil ihned po ukončení studia, zpočátku jako asistent v laboratoři elektrických přístrojů, později se postupně zapojoval i do ostatních předmětů. Dosud vedl 4 diplomové práce, každý rok je vedoucím minimálně jedné bakalářské práce. Byl školitelem 3 doktorandů s úspěšně obhájenou doktorskou prací. V současné době vede dva studenty PDS. Externě vyučuje předmět Optoelektronika na Přírodovědecké fakultě MU v Brně. Od roku 1999 se účastní činnosti Centra mechatroniky v Brně při Ústavu termomechaniky AV ČR.

Jeho vědecko-výzkumná činnost je zaměřena na diagnostiku a matematické modelování plazmatu v různých zařízeních pracujících s vysokoteplotním plazmatem. Konkrétně se zabývá počítačovým modelováním dynamiky elektrického oblouku ve VN vypínačích a teoretickými výpočty radiačního transportu energie v plazmatu. V roce 2001/02 byl hlavním řešitelem a koordinátorem mezinárodního projektu v rámci bilaterální spolupráce mezi ČR a Německem – projekt CZE01/021 „Záření elektrického oblouku ve spínacích přístrojích na vysoké napětí“ a navazujícího projektu MŠMT KONTAKT ME499. Účastní se řešení řady dalších výzkumných projektů.

Je členem organizačního výboru mezinárodního periodického sympozia „Fyzika spínacího oblouku“ pořádaného Ústavem výkonové elektrotechniky a elektroniky FEKT VUT v Brně. Od roku 2003 je členem podoborové komise GAČR (202 – pro fyziku).

Obsah

1 ÚVOD 5

1.1 Základní vlastnosti plazmatu 5
1.2 Krátký pohled do historie 6
1.3 Různorodost jednotlivých typů plazmatu 7
1.4 Zdroje plazmatu 8
1.5 Plazma jako zdroj světla 9
1.6 Další využití plazmových technologií 11
1.6.1 Automobilový průmysl 11
1.6.2 Úprava materiálů 11
1.6.3 Textilní průmysl 12
1.6.4 Nanášení tenkých vrstev 12
1.6.5 Nanostruktury 13
1.6.6 Využití plazmatu ve zdravotnictví 13
1.6.7 Kontrola nad emisemi 14
1.6.8 Výkonová zařízení s plazmatem 14
1.6.9 Termojaderné reakce 15
1.7 Výzkum plazmatu 15
1.8 Výhledy do budoucnosti 16

2 VLASTNÍ PŘÍNOS K ROZVOJI OBORU 17

2.1 Současný stav problematiky záření v plazmatu 17
2.2 Aplikace metody parciálních charakteristik 20

3 VÝUKA PLAZMATU NA FEKT VUT V BRNĚ 22

ZÁVĚR 23

POUŽITÉ ZDROJE 24

ABSTRACT 25

1 ÚVOD

Moderní plazmové technologie dnes významně zasahují do mnoha průmyslových odvětví a dalších oborů lidské činnosti, jako je elektronika, strojírenství, výroba automobilů, optika, textilní průmysl, zdravotnictví, archeologie apod. V současné době můžeme pozorovat, jak plazmové technologie zvyšují kvalitu a zdokonalují vlastnosti řady produktů a výrobních procesů: plazmové nanášení vrstev se používá pro výrobu speciálních nástrojů a přípravu materiálů se specifickými vlastnostmi, případně úpravu povrchů plastů nebo textilií; plazmové leptání pomáhá při výrobě čipů pro nejvýkonnější počítače; plazmové zdroje osvětlení znamenají úsporu energie při vyšší účinnosti; plazmochemické procesy umožňují vytvářet nové syntetické materiály se speciálními vlastnostmi; plazma pomáhá při likvidaci nebo recyklaci toxických a jiných odpadních materiálů. V současné době jsou plazmové technologie – díky významnému pokroku ve vědeckém poznání fyziky plazmatu – dynamicky se rozvíjejícím mezioborovým odvětvím, jehož potenciál zdaleka není vyčerpán a jehož význam neustále poroste. Bohužel všeobecné povědomí o plazmových technologiích a plazmatu vůbec zůstává mezi širokou veřejností stále na velmi nízké úrovni. Cílem této přednášky je prezentace základních vlastností plazmatu a jeho využití ve vybraných praktických aplikacích. Zaměříme se na význam plazmových technologií, všimneme si již existujících úspěšných aplikací plazmatu a podíváme se na možnosti využití těchto technologií v budoucnosti. Podíváme se, jak a kde plazmové technologie ovlivňují náš každodenní život a jakým směrem se bude asi ubírat další vývoj v této oblasti.

1.1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PLAZMATU

Plazma rozhodně není žádným vynálezem nebo výtvorem člověka. Můžeme ho nalézt v nitru hvězd – včetně Slunce, v ohonech komet, v blesku při bouřkách. Polární záře je rovněž jedním z přírodních výskytů plazmatu. Slovo *plazma* pochází z řečtiny a znamená „formu“ nebo „tvar“, ale také „něco formované“. Tento název není zrovna nejvhodnější, protože plazma pro své kolektivní chování nemá sklon přizpůsobovat se vnějším vlivům; spíše se častěji chová, jako kdyby mělo svou vlastní hlavu. Zcela náhodně se stejným pojmem nazývá buněčná hmota nebo součást krve.

Obr. 1: Blesk je jedním z nejznámějších výskytů plazmatu v přírodě

Technické plazma má široké možnosti použití v rozličných oblastech výroby, včetně výroby moderních domácích spotřebičů. Toto rozsáhlé aplikační využití vděčí za svou existenci intenzivnímu výzkumu a vývoji této mladé a moderní technologie. Díky komplikovaným a nákladným způsobům generace plazmatu, obvykle elektrickým výbojem ve vyčerpané trubici, a také díky složitým fyzikálním procesům zůstávala fyzika plazmatu relativně exotickým výzkumným úsilím. Naštěstí pokrok ve vědeckém poznání fyzikálních procesů probíhajících v plazmatu umožnil vznik interdisciplinární technologie s obrovským potenciálem.

Plazmatem se obvykle označuje čtvrté skupenství hmoty. Pokud zahříváme pevnou látku, dojde nejdříve k jejímu roztavení na kapalinu a při ještě vyšších teplotách se kapalina přemění v plyn. Pokud budeme plynu dodávat další energii, stane se elektricky vodivým, přestože jako celek bude stále neutrální. K tomuto stavu dojde proto, že elektrony získají dostatek energie pro odtržení od atomu nebo molekuly plynu. Plazma je tedy směsí převážně kladně nabitých iontů, elektronů a neutrálních částic vykazujících kolektivní chování. Kolektivním chováním rozumíme pohyby, které nezávisí pouze na lokálních podmínkách, ale rovněž na stavu plazmatu ve vzdálených oblastech.

Nyní se dostáváme k nejvýznamnější vlastnosti netermického nízkoteplotního plazmatu široce využívané v některých dále popisovaných aplikacích: zatímco teplota iontů a neutrálních částic je obvykle menší než 100 °C, energie elektronů je taková, že odpovídá 10 000 °C. Tyto elektrony slouží jako mocný, avšak šetrný nástroj pro zpracování povrchů. Tento „horký chlad“ otevírá dveře k nevídaným možnostem pro zpracování materiálů s minimální spotřebou energie.

Odhaduje se, že celosvětový roční hrubý obrat výroby související s plazmovými technologiemi je 500 miliard Euro (rok 2002).

Přestože se plazmové technologie již využívají v řadě průmyslových odvětví – od výroby osvětlovacích zdrojů po úpravu povrchů, stále se jedná o velmi mladý obor, který má ještě hodně daleko k plnému využití jeho možností. Mezi příklady novějších aplikací plazmatu ve výrobě patří např. ekologické plazmové reaktory pro čistění odpadních plynů, plazmová úprava povrchu stavebního skla, plazmové světelné zdroje bez příměsi rtuti, úprava materiálů pro potravinářský nebo textilní průmysl a nejnověji též nanostrukturní materiály, které lze rovněž připravit s pomocí plazmatu.

1.2 KRÁTKÝ POHLED DO HISTORIE

Obr. 2: V roce 1770 profesor Lichtenberg poprvé vytvořil obraz elektrického výboje

Historie plazmových technologií začíná v 18. století. V roce 1770 profesor matematiky na univerzitě v Göttingenu Georg Christoph Lichtenberg poprvé vytvořil a zdokumentoval povrchové výboje mezi hrotovou elektrodou a kovovou deskou s izolační mezivrstvou. Pokud se na této vrstvě rozptýlily výtrusy kapradiny a mezi elektrodu a kovovou desku přiložilo napětí, vytvořil se obraz trsového výboje. Lichtenebergovy pokusy ještě nedokázaly zcela vysvětlit původ tohoto jevu. První pokus o jeho popis pochází od londýnského experimentálního fyzika Michaela Faradaye, který se ještě před svými známějšími studiemi o elektromagnetismu zabýval vlastnostmi zahřáté hmoty a jako první vyslovil hypotézu o čtvrtém skupenství hmoty. Tuto hypotézu potvrdil jeho krajan Sir William Crookes, který v roce 1879 objevil tento čtvrtý stav hmoty jako „zářící hmotu“ ve výbojových trubicích. Jeho experimentální zařízení obsahovalo elektrody v uzavřené a vyčerpané skleněné trubce. Přiložil napětí na elektrody a vývěvou čerpal vzduch z trubice. Výsledek: zbývající plyn v trubici začal žhnout zelenou barvou a objevila se i vrstevnatá struktura. Poprvé tak byl experimentálně pozorován doutnavý výboj. Tmavá oblast poblíž katody se dodnes nazývá Crookesův tmavý pás. Crookes definoval čtvrtý stav hmoty, který je velmi podobný plynnému skupenství a existuje při podmínkách vysokého vakua. Vyslovil i správnou hypotézu, že trubice obsahuje elektricky nabité molekuly nebo ionty plynu. To, co Crookes objevil, bylo *plazma*.

Dokonalejší popis procesů ve výbojových plynových trubicích provedl koncem 19. století Sir Joseph John Thomson, který publikoval práci o malých záporně nabitých částicích, které jsou nesrovnatelně malé vzhledem k velkosti atomů (atom je kladně nabitý pudink a elektrony hrozinky v něm).

Později byla Thomsonova myšlenka o existenci elektronů zdokonalena a rozšířena o existenci těžších kladně nabitých částic – iontů. Plazma tedy bylo definováno jako směs elektronů a iontů. Nyní už scházel pouze název. Plazmatem toto nové skupenství nazval Irving Langmuir. Tento americký chemik pozoroval v roce 1923 v ionizovaném plynu charakteristické oscilace, které závisely na hustotě a hmotnosti elektronů. Toto kolektivní chování v systému mnoha nabitých částic nazval *plazmové oscilace*.

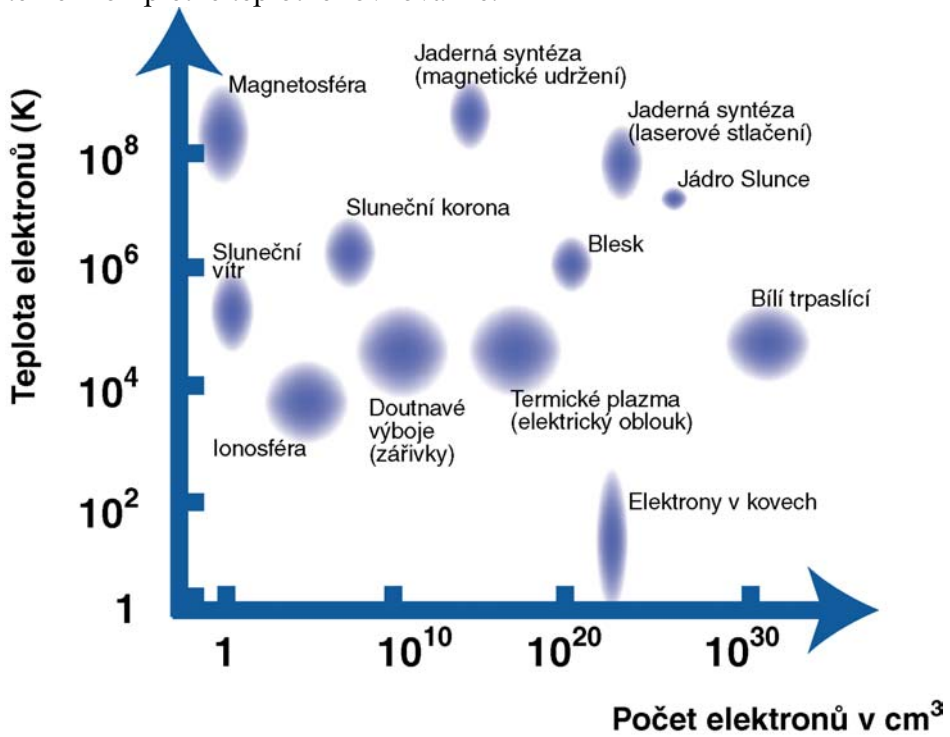
Ve 20. století byl velký zájem o plazma vyvolán možností vytváření diamantových vrstev v plazmatu. V roce 1953 se podařilo na technické univerzitě v Potsdamu vytvořit umělý diamant jako produkt plynového výboje v acetylénu. V 60. a 70. letech minulého století byly v Rusku vyvinuty metody přípravy diamantových vrstev z plynné fáze, v roce 1983 japonští vědci vytvořili diamantovou vrstvu v mikrovlnném plazmatu.

1.3 RŮZNORODOST JEDNOTLIVÝCH TYPŮ PLAZMATU

Různé typy plazmatu se odlišují podle toho, zdali se nachází nebo nenachází v teplotní rovnováze. V případě teplotní rovnováhy (rovnovážné plazma) mají všechny částice stejnou teplotu, tedy i energii. Typickým příkladem rovnovážného plazmatu jsou nitra hvězd. V případě nerovnovážného plazmatu hovoříme zvlášť o teplotě elektronů a teplotě těžkých částic (molekul, atomů, iontů).

Plazma je možné vytvořit z plynného prostředí zahříváním, elektrickým polem nebo elektromagnetickými vlnami. Ve všech případech je výsledkem rychlejší pohyb částic plynu – atomů a molekul, u kterých se zároveň zvyšuje jejich vnitřní rotační a vibrační energie. Díky narůstajícím srážkám mezi těmito částicemi dochází k disociaci molekul a ionizaci atomů, tedy ke vzniku volných nosičů náboje – lehkých elektronů a těžších iontů.

Podle způsobu vytvoření se plazma může nacházet v širokém spektru stavů od extrémně nerovnovážného po téměř kompletně teplotně rovnovážné.



Obr. 3: Různé typy plazmatu podle koncentrace a teploty elektronů

Parametry plazmatu se liší v širokém rozmezí hodnot. Například hustota elektronů se může měnit v rozmezí od 1 do 10^{25} částic v kubickém centimetru. Střední volná dráha částic, tj. střední vzdálenost, kterou urazí než se srazí s jinou částicí, může být dlouhá desítky miliónů kilometrů, ale také několik málo mikrometrů.

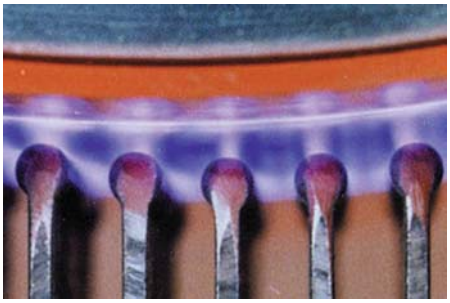
Pro technické využití má velký význam nerovnovážné plazma, protože je zde možné samostatně kontrolovat teplotu iontů a neutrálních částic na jedné straně a teplotu elektronů na straně druhé. Pro inicializaci chemických reakcí je nejdůležitější teplota elektronů. Pokud se mění podmínky vzniku plazmatu volbou různých nosných plynů, velikostí příkonu nebo změnou geometrie chemického reaktoru, je možné vytvářet různé aplikace pro technické procesy. Právě v této va-

riabilitě leží obrovská výhoda technologií využívajících nízkoteplotní nerovnovážné plazma. Snadno lze měnit takové vlastnosti materiálů jako je koeficient tření, otěruvzdornost, elasticita, odolnost proti vysokým teplotám a chemicky agresivním prostředím, optická propustnost apod. Tím jsou tyto techniky rozhodující pro moderní strojírenství, automobilový, letecký či obranný průmysl. Například v leteckém motoru je zhruba 5 000 součástek, které se připravují plazmovými technologiemi.

1.4 ZDROJE PLAZMATU

Zdroje plazmatu se navzájem velmi liší. Některé pracují při velmi nízkém tlaku plynu, jiné při atmosférickém nebo vyšším tlaku. Vznik plazmatu lze vybudit stejnosměrným nebo střídavým proudem, případně vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. Plazmové zdroje mohou pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu. Pokud přiložíme napětí na dvě elektrody ve vyčerpané skleněné trubici, dojde za vhodných podmínek ke vzniku plazmatu – doutnavému výboji. K zapálení výboje dojde díky malému počtu nabitých částic, které jsou v plynu vždy přítomné. Po jejich urychlení napětím na elektrodách a následných srážkách s ostatními částicemi plynu dojde k lavinovitému zvyšování počtu nabitých částic ve výbojové trubici.

Obr. 4: Doutnavý výboj


Obr. 5: Bariérový výboj

Pokud se napětí na elektrodách bude dále zvyšovat, lavinová ionizace bude sílit a v důsledku intenzivního bombardování záporné elektrody (katody) kladnými ionty se bude katoda silně zahřívat. Elektrony v kovovém materiálu katody získají dostatečnou energií pro výstup do prostoru výboje – doutnavý výboj přechází v elektrický oblouk. Zde se setkáváme s mnohem většími proudy ve srovnání s doutnavým výbojem, katoda se zahřívá na několik tisíc stupňů a její materiál ovlivňuje i složení obloukového plazmatu. Mezi moderní aplikace využívající obloukové plazma patří obloukové lampy pro osvětlování nebo obloukové pece pro tavení kovového šrotu nebo slitin a kovů s vysokým bodem tavení (titan, tantal, molybden, niob apod.)

Při atmosférickém tlaku se můžeme setkat s koronovým nebo bariérovým výbojem. Korona vzniká v nehomogenním elektrickém poli, například v okolí hrotové elektrody. Bariérové výboje jsou typické pro takové uspořádání, kdy je na jedné nebo obou plošných elektrodách nanesena izolační vrstva nebo je úzký prostor mezi elektrodami vyplněn plynem. Oba tyto typy jsou charakteristické velkou aktivní plochou plazmatu. Korona má členitou strukturu, zatímco bariérový výboj je převážně homogenní.

Obr. 6: Stejnosměrný oblouk v tavicí peci

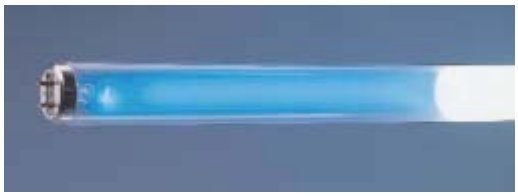
Elektrický výboj ve vysokofrekvenčním elektromagnetickém poli je dalším typem plazmatu široce využívaným v technické praxi. Vznik plazmatu opět závisí na výskytu přirozených nosičů náboje v plynu, které jsou schopné absorbovat energii pole a ionizovat další atomy. Podle vazby mezi elektromagnetickým polem a plazmatem rozlišujeme pak kapacitně vázané (CCP) nebo induktivně vázané (ICP) plazma. Kapacitně vázané plazma vzniká přiložením vysokofrekvenčního napětí na vodivé elektrody, které mohou být uvnitř nebo vně plazmatu oddělené dielektrickou vrstvou. Induktivně vázaný výboj se vytváří v elektromagnetickém poli vysokofrekvenční cívky. Principiálně se jedná o bezelektrodový výboj. Energie vysokofrekvenčního pole je pohlcována elektrony, které jsou schopné díky své malé hmotnosti reagovat na rychlé změny pole. Vysokofrekvenční elektrické pole je často doplňováno

vnějším magnetickým polem, aby se zabránilo ztrátám na stěnách výbojové nádoby.

V mikrovlnném plazmatu je energie stejně jako v mikrovlnných troubách přenášena elektromagnetickými oscilacemi s frekvencí mnohem vyšší než v předchozím případě, avšak nižší než je frekvence tepelného záření. Tento typ výboje umožňuje dosahovat vysoké hustoty plazmatu a díky nízkým hodnotám kinetické energie iontů je vhodný pro nedestruktivní úpravu povrchů.

1.5 PLAZMA JAKO ZDROJ SVĚTLA

Moderní osvětlovací výbojky jsou doslova „zářícím" příkladem vlivu plazmových technologií na náš každodenní život. Většina světla kolem nás, venku nebo ve vnitřních prostorách, ve dne nebo v noci má původ v plazmatu. Denní světlo pochází od Slunce, které je tvořeno plazmatem stejně jako zářící hvězdy na noční obloze. Ulici v noci osvětlují obloukové lampy, také světlo z běžné zářivky pochází primárně z plazmatu. Dokonce i plamen svíčky patří mezi částečně ionizované plyny, které spadají do plazmatického skupenství. Dá se tedy téměř s určitostí tvrdit, že vyjma klasických žárovek všechno světlo kolem nás pochází z plazmatu.

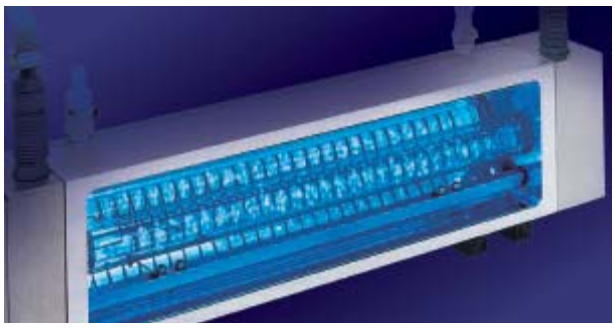


Obr. 7: Plazma v zářivkách generuje ultrafialové světlo, které se konvertuje na viditelné pomocí fosforové vrstvy na vnitřní stěně trubice. Na obrázku je část výbojové trubice zbavená bílé fosforové vrstvy, takže je patrný modrý doutnavý výboj uvnitř

Mezi dva základní typy umělých zdrojů světla využívajících plazmatu patří fluorescenční výbojky (zářivky) a vysokotlaké obloukové lampy. V obou případech se využívá konverze elektrické energie na světlo s daleko vyšší účinností než u klasických žárovek pracujících s rozžhaveným wolframovým vláknem. Plazmové světelné zdroje nabývají stále větší důležitosti díky své vysoké účinnosti a šetrnosti vůči životnímu prostředí. Například světelná účinnost obloukových výbojek je asi sedmkrát vyšší ve srovnání s klasickými žárovkami. Pokud by plazmové světelné zdroje celosvětově zvýšily světelnou účinnost o 7 %, znamenalo by to úsporu kolem 200 miliard kWh. Stále je však co zlepšovat, neboť i obloukové výbojky zatím dosahují pouze jedné třetiny teoretické světelné účinnosti. Navíc mnoho dnes vyráběných světelných zdrojů obsahuje ekologicky nežádoucí rtuť.

Zhruba před 70 roky přišli vědci na myšlenku využít nízkotlaký elektrický výboj s nízkou spotřebou energie pro osvětlovací účely. Jako nosné médium se ukázaly být vhodné snadno excitovatelné páry rtuti. Pro zlepšení elektrických parametrů byl do skleněné vyčerpané trubice přidáván i další plyn, obvykle argon. Naneštěstí excitované atomy a ionty rtuti vyzařovaly světlo pouze v neviditelné ultrafialové oblasti. Tento problém se odstranil nanesením fluorescenční látky na vnitřní stěnu výbojové trubice. Tak vznikla klasická zářivka (anglicky *„fluorescent tube"*), která se komerčně vyrábí od roku 1938. Nepřetržitý vývoj těchto nízkotlakých plazmových výbojek vedl až k dnes populárním úsporným kompaktním „žárovkám", které jsou vlastně miniaturními zářivkami s velmi nízkou spotřebou elektrické energie.

Nejnovější výzkumy ukazují, že je dokonce možné se vyhnout i použití nežádoucí rtuti ve výbojových trubicích a nahradit ji tzv. excimery. O vzácných plynech (argon, krypton, xenon) je známo, že jejich atomy mají uzavřené elektronové slupky a v základním stavu existují jen jako atomy. Dvouatomové molekuly, tzv. dimery, existují pouze v excitovaném stavu (odtud název excimer = excitovaný dimer). Excimery mají extrémně krátkou dobou života a při svém rozpadu emitují velmi intenzívní, téměř monochromatické záření. Je známa řada těchto látek, které spolu s volbou

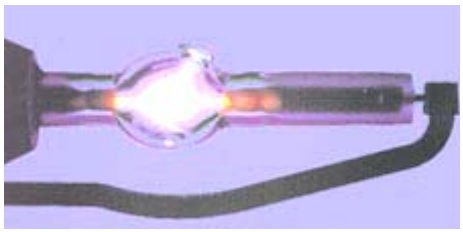


Obr. 8: Excimerová výbojka

vhodné plynné směsi umožňují generovat záření na různých vlnových délkách. Stále však přetrvává problém v nalezení vhodné látky pro účinnou konverzi UV záření na bílé světlo. Jednou z prvních aplikací těchto světelných zdrojů jsou podsvícené LC displeje počítačů. Další využití excimerů v technické praxi je tvrzení některých látek (např. nátěrů) ultrafialovým světlem. Výhodou je, že takto ozařovaný povrch se nezahřívá, takže je možné podrobit intenzivnímu UV záření i materiály citlivé na teplo.

Obr. 9: V obloukových výbojkách plazma generuje přímo viditelné světlo

Historické kořeny vysokotlakých plazmových výbojek sahají ještě hlouběji do minulosti ve srovnání s jejich nízkotlakými příbuznými. Jejich vývoj souvisí s objevem elektrického oblouku Angličanem Davym. Davy uveřejnil své údaje o „elektrickém světle“ mezi uhlíkovými elektrodami v roce 1810. Uvádí, že v ohřátém vzduchu mezi dvěma uhlíkovými elektrodami z dřevěného uhlí vznikne konstantní výboj, jestliže byly uhlíky přiblíženy na dotyk a potom opět oddáleny. Elektrody byly vodorovné a výboj tvořil „oblouk“. Z této podobnosti s geometrickým tvarem vznikl název pro tento elektrický výboj. V 19. století se elektrický oblouk využíval pro osvětlovací účely ve formě uhlíkových obloukových lamp. Dnešní obloukové lampy pracují při tlaku mnohonásobně vyšším než je atmosférický se světelnou účinností blížící se maximální možné hodnotě.



Obr. 10: Vysokotlaké obloukové výbojky používané v moderních automobilech obvykle přežívají svého hostitele a produkují jasné světlo kvalitativně podobné dennímu

Parametry plazmatu v zářivkách a obloukových lampách jsou značně odlišné. Klasické zářivky pracují při velmi nízkém tlaku plazmatu, asi 0,4 % atmosférického. To odpovídá počtu zhruba 10^{11} částic v kubickém centimetru ve středu trubice. Některé z těchto částic, konkrétně záporně nabité elektrony, mohou nabývat vysokých teplot, řádově 10^4 K. Naproti tomu těžké částice, jako jsou atomy a ionty, zůstávají relativně chladné, takže při dotyku svítící zářivky se nespálíme. Podmínky ve vysokotlaké obloukové výbojce jsou jiné. Všechny částice včetně těžkých mají vysokou tepotu (typicky kolem 10^4 K), tlak dosahuje několikanásobku atmosférického a hustota dosahuje řádově 10^{15} částic v kubickém centimetru. V zářivkách plazma září v neviditelném ultrafialovém oboru (díky malé příměsi rtuti v plynu), proto se na vnitřní stěnu trubice nanáší vrstva fosforu (bílá barva nesvítící zářivky), která konvertuje ultrafialové záření na viditelné. Plazma v obloukových výbojkách (vysokotlaké rtuťové nebo sodíkové výbojky nebo metal-halidové lampy) generuje přímo viditelné světlo.

Výkonné obloukové zdroje světla mohou mít ještě další nesmírný význam pro náš život. Bylo zjištěno, že světlo z umělých plazmových zdrojů je jediným výtvorem člověka, který lze spatřit z okolního vesmíru. Právě toto charakteristické světlo by mohlo být známkou inteligentního života pro případné okolní civilizace.

Obr. 11: Fotografie ze satelitu zobrazuje noční osvětlení amerického kontinentu, které pochází převážně z obloukových lamp. Právě toto světlo by mohlo být signálem o naší existenci pro ostatní vesmírné civilizace

Současný výzkum v oblasti plazmových světelných zdrojů je zaměřen převážně na snížení ztrát, které vznikají při interakci excitovaných atomů a molekul se stěnami výbojky, na zvýšení životnosti elektrod (případně i odstranění elektrod z aktivního prostředí) a hledání vhodných luminiscenčních látek.

1.6 DALŠÍ VYUŽITÍ PLAZMOVÝCH TECHNOLOGIÍ

1.6.1 Automobilový průmysl

Dnešní výrobci automobilů permanentně čelí protichůdným požadavkům: při zajištění větší mobility automobilů je třeba dosáhnout nízkou spotřebu energie a co nejnižší škodlivé emise. K dosažení tohoto cíle značně přispívají i plazmové technologie. Napomáhají snížení spotřeby paliva, zajišťují téměř dokonalé osvětlení, čistí výfukové plyny. Vnitřní povrch palivových nádrží je možné upravit mikrovlnným výbojem a zdokonalit tak jejich těsnost. Textilie pro potahy sedadel se upravují koronovým výbojem, jsou potom měkčí a snáze se barví, bez nutnosti používat těžké kovy. Plastové materiály používané např. pro nárazníky mají mnohem vyšší přilnavost pro barviva pokud se před barvením jejich povrch podrobí vysokofrekvenčnímu výboji. Speciální tvrdé povrchy připravované v plazmatu snižují tření součástí motorů a převodovek a zvyšují tak účinnost a životnost. Řidičům pomáhají při řízení různé informační prvky se snadno čitelnými plazmovými displeji. U automobilů budoucnosti lze očekávat například plazmový vznětový systém. U takového systému by elektrody nemusely nutně zasahovat dovnitř spalovací komory. Rychlost zapalování by se mohla pohybovat v řádu nanosekund, horké plazma by mohlo účinněji interagovat se spalovací směsí. Dalším cílem ve vývoji moderních automobilů je použití plazmového reaktoru ve výfukovém systému. Přestože se dnes používají účinné trojcestné katalyzátory, jejich slabinou je start motoru, kdy je katalyzátor ještě studený a tedy méně účinný. Plazmový reaktor pracující s bariérovým výbojem by byl schopen okamžitě přeměnit nespálené uhlovodíky, oxid uhelnatý a oxidy dusíku na netoxické plyny.

Obr. 12: Ilustrace přímého nebo nepřímého využití plazmatu při výrobě automobilů

1.6.2 Úprava materiálů

Vlastnosti různých částic plazmatu se dramaticky mění, pokud dojde k jejich kontaktu s povrchem pevné látky. Takový kontakt je obvykle doprovázen ztrátou energie a náboje. Avšak ztráta energie nezůstává bez následků, ve skutečnosti je energie předávána povrchu materiálu specifickým způsobem, který závisí na typu plazmatu. Plazma je ve skutečnosti vynikajícím prostředkem pro úpravu povrchu materiálů. Na jedné straně je možné plazmatem upravit povrch na molekulární úrovni, takže bude schopen snadné vazby s jinými látkami. Na druhé straně je možné vhodnou volbou pracovního plynu pokrývat povrch novými vrstvami. Typickým příkladem je příprava povrchů před barvením pro zajištění dokonalejší adheze barviva nebo vytváření vrstevnatých (sendvičových) struktur tenkých vrstev. Schopnost plazmatu ovlivňovat vlastnosti povrchů pochází z vysoké energie elektronů, které jsou schopné přetrhat chemické vazby. Vedle úpravy povrchů je možné plazma využívat i pro jejich čistění. Bez použití ekologicky nebezpečných chemikálií umožňuje plazma finální čistění kovových a jiných povrchů od organických látek. Vysokofrekvenční plazma se používá např. i pro čistění archeologických předmětů (např. starověkých mincí).

1.6.3 Textilní průmysl

Plazmové technologie se využívají i v textilním průmyslu, kdy se technické textilie zpracovávají plazmatem například za účelem zvýšení jejich odolnosti proti vodě, olejům apod. Pro tyto účely se nejčastěji využívá bariérový výboj při atmosférickém tlaku. Během procesu se používá postupně několik pracovních plynů v plazmatu, které umožňují na textilních vláknech vytvořit různé vrstvy zajišťující např. vhodnou adhezi, krytí nebo odpudivost vůči nějaké látce. Využití je opět rozsáhlé, technické textilie se používají např. u ochranných oděvů, v automobilech nebo stavebním průmyslu. Takové textilie musí být pevné a elastické, hydrofobní (nebo naopak hydrofilní), odolné chemikáliím a snadno barvitelné. I váš vlněný oděv byl možná podroben plazmovému zpracování. Výzkumy totiž ukázaly, že vlněné vlákno zpracované bariérovým výbojem je více odolné ztrátám proteinů během procesu barvení. Zatímco při klasickém chemickém zpracování vláken jsou ztráty vlněného materiálu kolem 2 %, u plazmové technologie jsou tyto ztráty zanedbatelné. Podobně koronový výboj ve vzduchu zdokonaluje přilnavost barviva k textilnímu vláknu. Snižuje se tak množství potřebného barviva a tedy i množství odpadních produktů. Navíc rozložení barviva je více homogenní ve srovnání s chemickým procesem barvení.

Obr. 13: Zařízení pro zpracování textilu bariérovým výbojem

1.6.4 Nanášení tenkých vrstev

Nosným médiem v technologiích využívajících plazma nemusí být pouze vzácné plyny. Například dusík je plyn, který je za normálních podmínek inertní. V plazmatickém skupenství dvouatomové molekuly dusíku disociují. Produktem rozpadu jsou radikály, které se snadno podílejí na reakcích probíhajících na povrchu pevných látek. Této vlastnosti se s úspěchem využívá při výrobě speciálních tvrdých nástrojů a komponent, jako např. vrtáky, ložiska, ozubená kola. Při tomto procesu dochází k nanášení speciálních vrstev, jejichž vlastnosti jsou dány parametry plazmatu.

Obr. 14: Dveřní klika s uhlíkovým povrchem nanášeným v plazmatu

V současné době probíhají výzkumy v oblasti úpravy PET lahví pro uchovávání piva. Běžné PET láhve nejsou pro tyto účely vhodné hlavně proto, že PET materiál není schopen zabránit vstupu kyslíku do láhve a naopak úniku oxidu uhličitého z láhve, což jsou nepříznivé vlivy zhoršující chuť piva. Tento problém může opět vyřešit plazmová technologie. Speciální vrstva amorfního uhlíku nanesená v plazmatu na vnitřek láhve nepropustí ani kyslík ani oxid uhličitý, přestože je její tloušťka 100 nanometrů. Jiný postup předpokládá nanesení vrstvy oxidu křemičitého na vnější stěnu láhve. Výhodou takto upravených lahví je, že jsou čiré stejně jako sklo. PET láhve s plazmovou úpravou povrchu se jistě v brzké době stanou velkým konkurentem klasických skleněných pivních lahví. Ekonomický přínos je zřejmý – ročně se spotřebuje asi 300 miliard skleněných pivních lahví.

Pomocí PCVD procedur (*Plasma-Chemical Vapour Deposition*), které využívají chemicky aktivních plynů pro jejich nanášení na substrát, je možné vytvářet milimetr hluboké diamantové vrstvy o průměru několika centimetrů. Tyto se pak s úspěchem používají jako chladicí podloží pro mikročipy nebo v laserových diodách. Diamant vede teplo pětkrát lépe než měď, je však elektricky neutrální. Diamant nebo diamantové vrstvy lze nanášet na povrch pracovních nástrojů za účelem snížení jejich opotřebování.

Další využití plazmových technologií je nanášení vrstev na stavební sklo. Takto upravené okenní tabule představují obrovské úspory energie, která v zimě činí až 60 % ve srovnání s klasickým okenním sklem. Pokud se na sklo nanese tenká vrstva ze speciálních kovů a oxidů, bude

viditelné světlo procházet bez jakéhokoliv útlumu, zatímco tepelné záření na dlouhých vlnových délkách bude pohlcováno.

Plazma lze použít nejenom k nanášení vrstev na povrch materiálů, ale i k odstraňování materiálů z povrchu. V takovém případě hovoříme o plazmovém leptání (*plasma etching*). Procedury tohoto typu lze použít k strukturovanému členění povrchu, velký význam mají při výrobě čipů v elektronice. Bez plazmového leptání bychom dnes stěží měli k dispozici výkonné počítače a paměťové čipy. Tyto technologie totiž umožňují vytváření podstatně menších struktur ve srovnání s klasickým mokrým chemickým leptáním.

Planární povrchy se obvykle zpracovávají planárním výbojem, nejčastěji bariérovým. Při takových procesech však může docházet k nestabilitám vedoucím až třeba k částečným průrazům, které mohou poškodit zpracovávaný povrch. Tomuto problému se lze vyhnout použitím pulzního plazmatu. Každá nestabilita vyžaduje pro svůj vývoj určitý čas. Plazma v pulzním režimu nenechá dostatečný čas pro tvorbu nežádoucích výbojů.

1.6.5 Nanostruktury

Vzhled nějakého objektu je určen vlastnostmi jeho povrchu. Povrch je důležitý i z hlediska snášivosti nebo tření. Pokud budou na povrchu struktury nanometrových rozměrů, mohou se objevit zcela nové vlastnosti. V dnešní době se začíná plazma prosazovat i v tzv. nanotechnologiích. Při nošení brýlí se setkáváme s nežádoucími odrazy světla na rozhraní vzduch-sklo. Tento problém se klasicky řeší nanášením antireflexních vrstev. Je zde však jiná alternativa, kterou je vytvoření povrchu skla s nanostrukturami, podobně jako je tomu u zrakových orgánů hmyzu. Pro vytvoření takové struktury u velkého počtu vzorků lze použít nějakou raznici. Právě při přípravě takového „razítka“ lze s úspěchem využít plazmatu. Pomocí plazmatu lze totiž vytvořit na kovovém povrchu keramickou vrstvu s nějakou nanostrukturou, která se pak „narazí“ třeba na plexisklo. Vytváření nanostruktury je v podstatě samoorganizovaný proces, je však třeba správně nastavit parametry plazmatu. Jinou aplikací plazmatu je třeba vytváření specifických nanostrukturních materiálů, například hydrofobních nebo hydrofilních.

1.6.6 Využití plazmatu ve zdravotnictví

Obr. 15: Umělý kloub při plazmovém nanášení vnější vrstvy

Umělé kloubní hlavice a kloubní jamky se připravují rovněž s použitím plazmových technologií. Na styčný povrch se plazmaticky nanáší speciální tvrdé vrstvy, které zajišťují životnost umělého kloubu. V současné době se vyvíjejí nové technologie, které zajistí dokonalejší srůst umělého kloubu s přirozenou kostní tkání. Keramické materiály podobné kostní tkáni nanášené na kovové implantáty kombinují vysokou pevnost kovu s vhodnou biokompatibilitou keramické vrstvy. Vytváření vrstev na implantátech se může provádět například postupným nanášením různých materiálů, takže lze dosáhnout spojitého přechodu mezi bioaktivním materiálem a kovovým masivem implantátu. Tímto způsobem se minimálně odstraní problém nevhodné adheze vrstev při náhlém přechodu mezi dvěma materiály různých mechanických vlastností.

Plazma se v medicíně může použít i pro sterilizační účely. Příkladem je sterilizace umělohmotných hadiček pro dialýzu v procesu jejich výroby a balení. Výhodou plazmové sterilizace je, že zároveň lze nanášet na vnitřní stěnu hadiček antikoagulační vrstvu, která zabrání srážení krve při proudění hadičkou. Tak se eliminuje riziko vytváření krevních sraženin a pacientům stačí menší dávky protisrážlivých léků. Význam plazmové sterilizace spočívá v možnosti sterilizovat látky, které nelze vystavit nadměrnému oteplení. Doposud se taková sterilizace prováděla gama paprsky nebo na chemické bázi. Při použití plazmatu se využívá ultrafialového světla generovaného přímo plazmatem nebo efektu reaktivních plynů. Příkladem nejmodernější aplikace plazmatu

pro sterilizaci jsou enzymatické biosenzory, které se používají pro nepřetržité monitorování hladiny cukru v krvi u pacientů trpících diabetem. Tyto biosenzory se implantují pod kůži a je tedy třeba je sterilizovat. Jsou však velmi citlivé, takže klasické sterilizační metody by je mohly zničit. Právě plazma pomáhá řešit tento problém. Jinou aplikací plazmatu v medicíně je spalování nebezpečného zdravotnického odpadu v plazmových pecích.

1.6.7 Kontrola nad emisemi

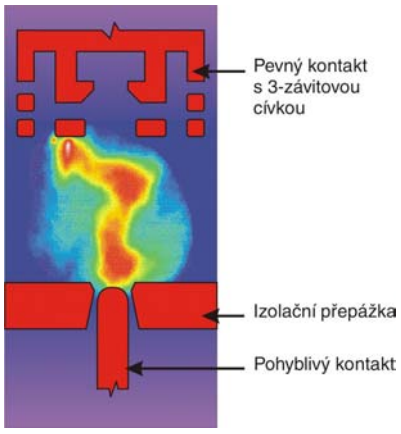
Plynné odpady, které by mohly znečisťovat okolní prostředí, lze vyčistit plazmatem. Již řadu let se používá elektrostatické čistění kouře např. ve spalovnách nebo tepelných elektrárnách. Cílem je zamezit úniku prachových částic o velikosti řádově mikrometry až desítky mikrometrů, které jsou obzvláště nebezpečné pro klima (odrážejí sluneční záření) a jsou i zdraví škodlivé. V současnosti používané elektrostatické filtry využívají koronový výboj pro elektrické nabití prachových a kouřových částic. Tyto jsou pak elektrickým polem odkloněny do sběrného systému. Účinnost takových filtrů je kolem 98 %. Bohužel tento typ filtrů není vhodný pro filtraci menších částic (řádově mikrometr a menší), které jsou snadno vdechovány a mohou být zdraví velmi nebezpečné. Předchozí postup filtrace není vhodný, protože vyžaduje neprakticky vysoká elektrická pole pro nabití takto malých částic. Řešením mohou být plazmové pulzy. S moderní polovodičovou technikou bude v budoucnosti možné spínat pulzy o výkonu 50 MW při frekvenci 200 Hz. Takové vysokonapěťové pulzy by se superponovaly na plazma v částicových filtrech a separovaly by se nejmenší částice. Krátká doba trvání vysokonapěťového pulzu zabrání elektrickému průrazu na filtru.

1.6.8 Výkonová zařízení s plazmatem

V současnosti největší a nejvýkonnější zařízení s plazmatem pracují v kontinuálním režimu při výkonu desítek MW. Jedná se o tavicí pece určené pro tavení kovového šrotu, slitin nebo kovů s vysokým bodem tavení, jako je titan, tantal, molybden nebo niob. V těchto zařízeních není problém řídit teplotu plazmatu pro optimální proces lití. Obloukové pece se využívají i pro spalování nebezpečných odpadů. Díky vysoké teplotě plazmatu lze rozložit dioxiny i jiné toxické látky. Plazma lze využít i k řezání, sváření nebo vrtání materiálů.

Obr. 16: Plazmové řezání ocelových plátů

V neposlední řadě je plazma i součástí vypínacího procesu ve výkonové spínací technice. Vypínání silnoproudého elektrického obvodu je doprovázeno vznikem elektrického oblouku mezi kontakty vypínače. Vypínací oblouk realizuje vlastní přerušení proudu. Z hlediska vypínače je oblouk nežádoucí element. Plazma oblouku má vysokou teplotu, která způsobuje velké opotřebování kontaktů během vypínacího procesu. Rozsah opotřebení je kromě velikosti vypínacího proudu závislý na době existence oblouku mezi elektrodami.



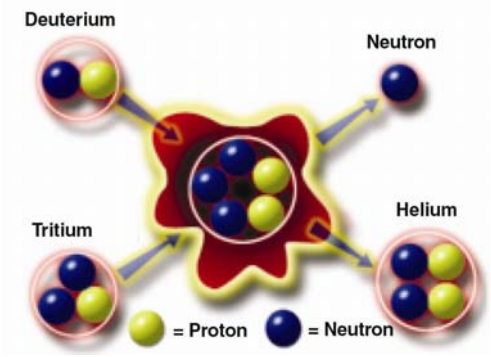
Obr. 17: Spínací oblouk ve zhášecí komoře výkonového vypínače

Při komplexním vyšetřování celého vypínacího procesu musíme uvažovat i pozitivní vlivy existence oblouku ve vypínacím procesu. Je to přeměna většiny elektromagnetické energie akumulované v obvodu v energii tepelnou, která je snadněji zvládnutelná než přepětí vznikající při vypínání bez oblouku. Tento jev je nejnápadnější při vypínání stejnosměrného proudu. Tepelné vlastnosti elektrického oblouku jsou hlavním problémem při zvládnutí vypínacího procesu.

Vypínací proces je velice krátký děj (řádově desítky milisekund) a pro jeho diagnostiku je nutné používat speciálních technik, včetně rychlostní fotografie.

1.6.9 Termojaderné reakce

Termojaderné reakce probíhající v plazmatu s velkou teplotou jsou teoreticky velmi výhodným zdrojem energie. Jako nejvýhodnější z nich se jeví ty, které používají deuteria jako jednu z reagujících složek, poněvadž jeho zásoby v mořské vodě jsou téměř nevyčerpatelné. Teoreticky by jeho zásoba byla schopna krýt spotřebu veškeré elektrické energie vyráběné v současné době na celém světě po dobu déle než miliardu let.



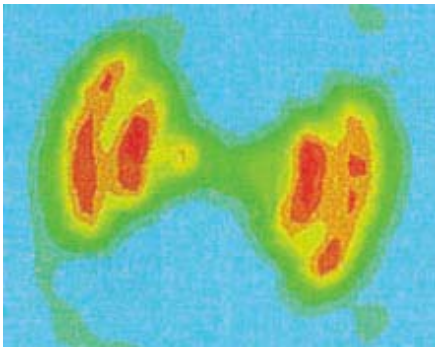
Obr. 18: Princip jaderné fúze

Zde je energie získávána spojením jader lehkých atomů při dostatečně malém přiblížení jadernou fúzí na jádra těžkých atomů při spojení se uvolní poměrně velká vazebná energie. Pro uskutečnění termojaderné reakce je nutné splnit podmínku, že součin počtu nabitých částic a času, ve kterém nevzniknou nestability, je větší než 10^{14} cm^{-3} s (Lawsonovo kritérium). Existují dva odlišné přístupy: udržení plazmatu magnetickým polem s charakteristickými hodnotami $n \approx 10^{15}\,cm^{-3}$ a $t \approx 0{,}1$ s a inerciální udržení s $n \approx 10^{26}$ cm^{-3} a $t \approx 10^{-11}$ s. Rozsáhlý výzkum možnosti technického využití jaderné fúze nastal v padesátých letech minulého století, kdy byla soustředěna velká pozornost na studium fyzikálních dějů v plazmatu, v osmdesátých letech byla teoreticky dokázána realizovatelnost termojaderných reaktorů, včetně optimistických proroctví o spuštění technicky využitelných reaktorů, vše ale naráží na skutečnost, že pro uskutečnění termojaderných reakcí jsou potřebné teploty řádově 10^8 K. Pro dosažení dostatečného výtěžku energie musí horké plazma, ve kterém probíhají jaderné reakce, existovat dostatečně dlouhou dobu. Současná technologie nedokáže vyrobit materiály, které by po tuto dobu odolávaly potřebným teplotám.

1.7 VÝZKUM PLAZMATU

Teoretický výzkum nízkoteplotního plazmatu je velice náročný, protože částice, pole a proudy v takovém plazmatu tvoří velice složitý systém. Největší problém pro vědce je studium interakce plazmatu s okolními pevnými látkami. Při této interakci dochází ke dramatickým změnám stavu částic a jejich energie. Materiály obklopující plazma, ať už ve formě stěn ohraničujících plazma nebo ve formě substrátu, na který plazma působí, silně ovlivňují stav plazmatu. Důsledkem toho je i fakt, že nelze nikdy hovořit o zcela čistém plazmatu, protože dochází k uvolňování částic z okolních materiálů a jejich difuzi dovnitř plazmatu.

Pro popis chování plazmatu v blízkosti pevných látek se používají různé modely. Zatímco „volné“ plazma v teplotní rovnováze lze popsat středními hodnotami, v blízkosti povrchu se částice chovají téměř individuálně a každá vyžaduje vlastní výpočet. Kromě toho částice v plazmatu se vyskytují v několika odlišných stavech, což činí modely ještě složitějšími. Teprve dnes je možné s pomocí výkonných počítačů modelovat procesy v nízkoteplotním plazmatu (za předpokladu, že se nejedná o velmi složité systémy).



Obr. 19: Příklad obrázku z plazmového tomografu

Experimentální výzkum plazmatu souvisí s jeho diagnostikou. Většina technologických procesů pracujících s plazmatem vyžaduje i odpovídající diagnostiku. Jedním z nejstarších diagnostických nástrojů je Langmuirova sonda. Jedná se v podstatě o drát, kterým se zjišťuje hustota elektronů nebo iontů v plazmatu. Výsledky takových měření je však pečlivě zvažovat, protože sonda může změnit lokální podmínky v jejím okolí (kolem sondy se vytvoří nevodivá vrstva). Jiný

způsob měření hustoty elektronů je metoda plazmových oscilací. Do plazmatu se zavede slabý paprsek elektronů ze žhavého drátu na negativním potenciálu. Tento paprsek vyvolá plazmové oscilace, které závisí na hustotě elektronů.

Velký význam pro diagnostiku plazmatu mají spektroskopická měření. Moderní spektroskopické přístroje využívají posledních poznatků ve vývoji fotodetektorů a laserových technologií. Příkladem moderní spektroskopické techniky je LIF (*laser-induced fluorescence*). Řada plazmových technologických procesů využívá jako pracovní médium molekulární plyny nebo plynné směsi a je třeba měřit složení těchto látek. LIF metoda umožňuje měřit prostorové i časové rozložení hustoty jednotlivých částic. Diagnostika energetických stavů atomů a molekul se provádí například absorpční spektroskopií s laditelnými laserovými diodami.

Přínosem pro optickou diagnostiku může být v současné době vyvíjená plazmová tomografie, která umožní získat nejenom skutečný obraz plazmatu, ale i informace o atomech a molekulách, jejich koncentracích a teplotách. Skládáním jednotlivých dvojrozměrných řezů bude možné počítat rozložení parametrů plazmatu v prostoru. Výkonné počítače budou schopné počítat parametry plazmatu v reálném čase, takže bude možné plazmovou tomografii používat přímo pro řízení výrobního procesu.

1.8 VÝHLEDY DO BUDOUCNOSTI

Mezi nejdůležitější úkoly, které je třeba do budoucna v oblasti plazmových technologií nízkoteplotního plazmatu vyřešit, patří:

- Interakce plazmatu s materiály – hraje klíčovou roli při zpracování povrchů.
- Nestacionární, periodicky nebo pulzně excitované plazma – ve srovnání se stacionárními systémy poskytuje větší počet stupňů volnosti pro ovládání procesu.
- Reakční kinetika vícesložkového plazmatu – odpovídá skutečnému stavu plazmatu.
- Vliv reakcí v plazmatu na jeho stav – procesy na styku plazmatu se stěnami nebo elektrodami.
- Modelování a simulace plazmatu – s rozvojem výpočetní techniky lze vytvářet složitější modely a simulace, blížící se reálným podmínkám.

V oblasti vysokoteplotního plazmatu mezi nejdůležitější výzkumné úkoly patří úspěšné zvládnutí řízené jaderné fúze za účelem získání nových zdrojů energie. Jaderná fúze je jedinou alternativou výroby energie v budoucnu. Zatím se zdá, že její uskutečnění přesahuje horizont několika desítek let. Problémy, jež jsou spojeny s vývojem termojaderného reaktoru, je možno rozdělit do tří hlavních skupin:

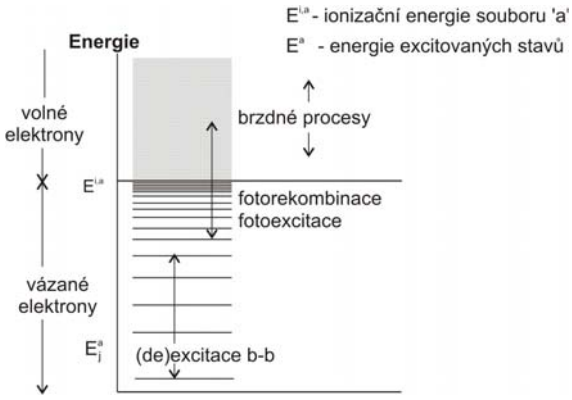
- udržení plazmatu,
- ohřev plazmatu,
- technická stránka termojaderné reakce.

Technické problémy se týkají projektu reaktoru samého bez ohledu na vlastní plazma. Mezi fyziky ještě zdaleka není jasno, která koncepce udržení plazmatu má největší perspektivu. Nová zařízení jsou finančně náročná a nové projekty narážejí na nedostatek financí a podpory ze strany parlamentů. Výzkum musí probíhat v rámci integrované mezinárodní spolupráce. Bohužel mezi nejbohatšími státy stále existuje řevnivost a vojenské utajování ještě pořád brání úspěšné kooperaci.

2 VLASTNÍ PŘÍNOS K ROZVOJI OBORU

2.1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY ZÁŘENÍ V PLAZMATU

Vysokoteplotní dynamika plynů se za posledních několik desetiletí vyvinula v moderní interdisciplinární oblast vědecko-výzkumné činnosti. Při výzkumu plazmatu se střetávají různé vědní obory, jako fyzika plazmatu, termodynamika a statistická fyzika, vysokoteplotní kinetika plynů, transportní procesy, materiálové inženýrství apod.



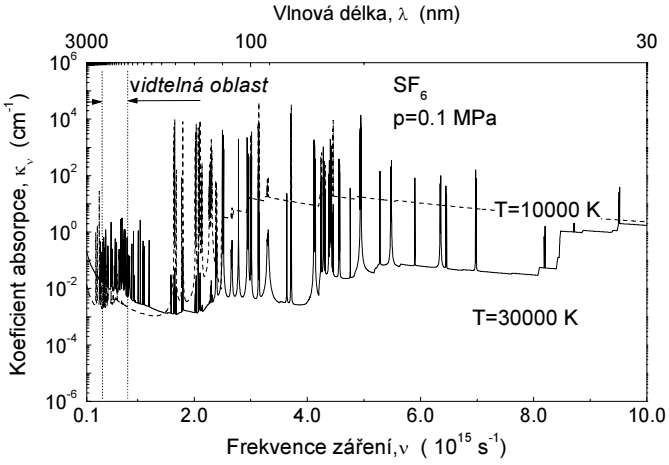
Obr. 20: Typy elektronových přechodů v atomu nebo iontu – původ čarového a spojitého záření v plazmatu

Ačkoli řada plazmových technologií je úspěšně používána v praxi, stále existuje řada otevřených problémů, jako jsou procesy probíhající v atmosférách hvězd, vstup kosmických těles vysokou rychlostí do atmosféry planet, oblouk v silnoproudé vypínací technice, plazmatrony apod.

Důležitou roli při výzkumu jevů a procesů probíhajících v plazmatu hraje záření a radiační přenos energie. Záření se v energetické bilanci plazmatu začíná významně projevovat při vysokých tlacích plazmatu (nad 0,101 MPa) a teplotách nad deset tisíc kelvinů, to znamená, že v mnoha úlohách popisujících výše uvedené problémy již není možné řešit dynamiku plynů bez znalosti pole záření a naopak nelze řešit přenos energie zářením bez určení dynamických parametrů plynu.

Hlavní náplní mé vědecké práce je teoretické modelování radiačního transportu energie v obloukovém plazmatu. Experimentální sledování problémů přenosu energie zářením je spojeno se značnými obtížemi. Ty jsou v prvé řadě způsobeny experimentálními podmínkami, při kterých se sledování provádí: vysoká teplota, tlak a rychlost plynu. Je třeba respektovat spojité i čarové záření emitované atomy a ionty, případně molekulami plynu (obr. 20). V podobných situacích neocenitelnou úlohu hraje matematické modelování. Výpočet umožňuje zpracovat experimentální data, spojit výsledky měření v jeden celek, mnohdy i objevit kvalitativně nové fyzikální jevy. Nelinearita rovnic popisujících pole záření a silná závislost vstupních veličin na frekvenci záření a vlastnostech prostředí činí matematické modely plazmatu velmi složitými.

Hustota toku záření a jeho divergence se počítají integrací koeficientu absorpce přes frekvence záření a prostorové úhly. Největší obtíže působí integrace přes frekvenci i za předpokladu lokální termodynamické rovnováhy. Spektrum plazmatu obsahuje stovky spektrálních čar. Koeficient absorpce jednotlivých spektrálních čar silně závisí na frekvenci záření, jeho hodnota se může měnit o několik řádů ve velmi úzkém spektrálním intervalu (obr. 21). Integraci přes frekvenci záření je nutné při výpočtu pole záření provádět opakovaně pro různé směry (integrace přes prostorové úhly), což je časově velmi náročné. Obvykle je takový výpočet prakticky nemožný i za použití výkonných počítačů.

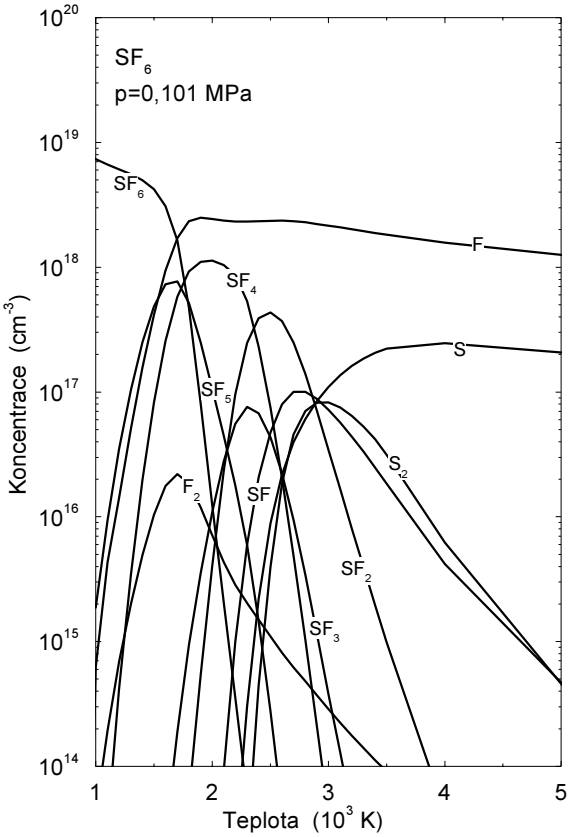


Obr. 21: Koeficient absorpce plazmatu SF_6 v závislosti na frekvenci záření při atmosférickém tlaku a různých teplotách plazmatu

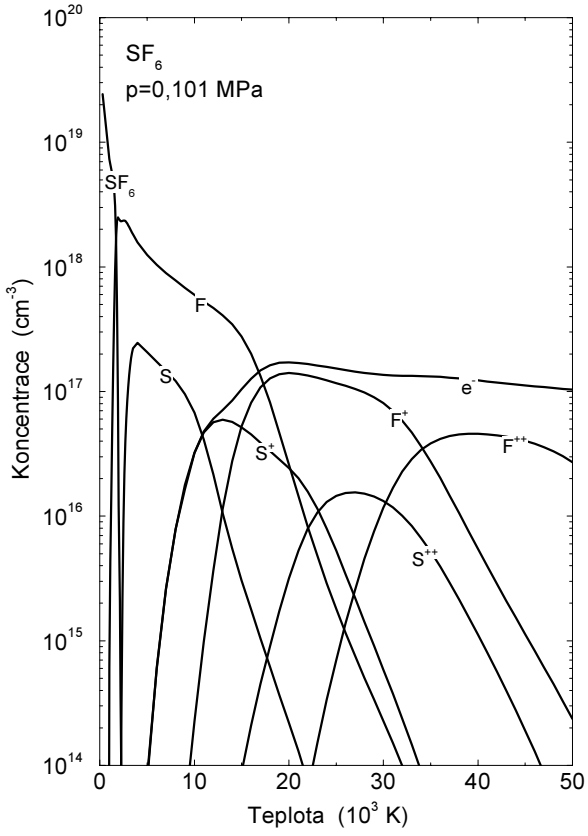
Jednou z nejdůležitějších fyzikálních veličin v problematice záření plazmatu je intenzita záření, která se definuje pro bod X a závisí na směru $X \rightarrow R$, kde R je hranice plazmatu. Z intenzity záření pak lze stanovit tok záření a divergenci toku záření – veličiny potřebné pro řešení dynamiky proudění plazmatu. Intenzita záření je dána vztahem

$$I_\nu(X) = \int_0^\infty \int_X^R \kappa_\nu(\xi) B_\nu(\xi) e^{-\int_X^\xi \kappa(\eta) d\eta} d\xi d\nu \qquad (1)$$

kde ν je frekvence záření, κ_ν je koeficient absorpce, B_ν Planckova funkce, a ξ, η jsou integrační proměnné. Největší potíže v tomto vztahu působí právě integrace přes frekvenci záření. Koeficient absorpce rovněž závisí na složení plazmatu, které je dáno chemickými reakcemi závislými na teplotě a tlaku plazmatu. Příklad složení plazmatu SF_6 v závislosti na teplotě je na obr. 22 a 23.



Obr. 22: Složení plazmatu SF_6 v závislosti na teplotě (do 5 000 K) při tlaku 0,101 MPa



Obr. 23: Složení plazmatu SF_6 v závislosti na teplotě (do 50 000 K) při tlaku 0,101 Mpa

V minulosti bylo navrženo několik aproximačních metod, ve kterých se integrace přes frekvenci provádí zvlášť před hlavním výpočtem radiačních charakteristik. Jednou z takových aproximací je použití koeficientu emise. Tato metoda je použitelná pouze v případě, že samoabsorpce plazmatu je malá. Australský vědec J. J. Lowke navrhl metodu izotermických koeficientů emise. Vypočtené koeficienty emise jsou funkcemi teploty plazmatu a poloměru sloupce plazmatu. Aplikace této metody na výpočet teplotního profilu plazmatu (závislost teploty plazmatu na poloměru) poskytuje správné výsledky v centrálních oblastech plazmatu, avšak není použitelná na okrajové části plazmatu, kde dochází k silné absorpci ultrafialového záření pocházejícího ze středu plazmatu. Tato absorpce je do výpočtu zahrnuta pouze hypoteticky, což ne vždy vede k výsledkům srovnatelným s experimentem. Další aproximační metodou je tzv. difuzní aproximace. Metoda je aplikovatelná pouze v případech, kdy dochází k silné absorpci. Využívá se zde efektivní tepelné vodivosti záření, která je funkcí teploty. Metoda je přesná pouze v případě, kdy lokální intenzita záření může být nahrazena Planckovou funkcí pro lokální teplotu plazmatu. praxi je tato metoda u obloukového plazmatu zatížena velkou chybou.

Velkým problémem při řešení přenosu energie zářením je absorpce záření pocházejícího z centrálních horkých oblastí plazmatu v okrajových chladnějších částech. Tento jev je funkcí jak teploty okrajové části plazmatu, která určuje koeficient absorpce v této oblasti, tak teploty v ose plazmatu, která ovlivňuje intenzitu záření vycházejícího ven z plazmatu. Výše uvedené aproximační metody nejsou schopné zahrnout oba jevy, emisi a absorpci současně, protože koeficienty emise jsou funkcí pouze jedné teploty. V metodě využívající efektivní tepelnou vodivost, emise a absorpce závisí na druhé derivaci lokální teploty.

V poměrně nedávné době byla v bývalém Sovětském svazu navržena nová metoda *„parciálních charakteristik“*, která umožňuje současně popsat jak procesy emise v centrálních částech plazmatu, tak i převládající absorpci na chladnějších okrajích. Za určitých, ne příliš zjednodušujících předpokladů lze pomocí této metody oddělit integraci frekvenční od integrace prostorové. Frekvenční integraci je možné provést předem vytvořením datových souborů dvou speciálních funkcí (nazývaných *Som* a ΔSim).

$$Som(T_X, T_R, |R-X|) = \int_0^{\infty} B_\nu(X)\,\kappa_\nu(X)\, e^{-\int_X^R \kappa_\nu(\eta)\,d\eta}\, d\nu \tag{2}$$

$$\Delta Sim(T_X, T_\xi, \xi - X) = \int_0^{\infty} \left[B_\nu(X) - B_\nu(\xi)\right] \kappa_\nu(X)\,\kappa_\nu(\xi)\, \exp\left(-\int_\xi^X \kappa_\nu(\eta)\,d\eta\right) d\nu \tag{3}$$

Obě funkce jsou definované pro lineární úsek plazmatu a závisí na počáteční a koncové teplotě T_X a T_R tohoto segmentu, na gradientu teploty a tlaku plazmatu. Principem metody je nahrazení teplotního profilu plazmatu při daném tlaku souborem lineárních segmentů, kde každý z nich je jednoznačně určen počáteční a koncovou teplotou a gradientem teploty. Vlastním řešením energetické bilance plazmatu je potom programové vyhledávání v příslušném datovém souboru, nalezení funkce *Som* a ΔSim pro každý segment a jejich následná integrace v prostoru.

S využitím parciálních charakteristik se tok záření spočítá podle vztahu

$$\mathrm{F}^{1D}(X) = \int_{-R}^{X} \Delta I\left(T_\xi, T_X, \overline{X\xi}\right) dx - \int_{X}^{R} \Delta I\left(T_\xi, T_X, \overline{\xi X}\right) dx \tag{4}$$

a podobně divergence toku záření

$$\nabla \mathrm{F}^{1D}(X) = \Delta I\left(T_{-R}, T_X, \overline{-RX}\right) + \Delta I\left(T_R, T_X, \overline{XR}\right) - \int_{-R}^{R} \Delta Sim\left(T_X, T_\xi, \overline{X\xi}\right) d\xi \tag{5}$$

Symbol *1D* v předchozích dvou rovnicích znamená, že se jedná o jednorozměrný případ, tedy lineární úsek plazmatu. Pro výpočet v *3D* prostoru je třeba integrovat přes prostorové úhly, takže výsledné vztahy pro tok a divergenci toku záření vypadají následovně

$$F_x^{3D}(X) = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} I\left(X,\theta,\phi\right) \sin^2\theta \cos\phi \, d\phi \, d\theta \tag{6}$$

$$F_y^{3D}(X) = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} I\left(X,\theta,\phi\right) \sin^2\theta \sin\phi \, d\phi \, d\theta \tag{7}$$

$$F_z^{3D}(X) = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} I\left(X,\theta,\phi\right) \sin\theta \cos\theta \, d\phi \, d\theta \tag{8}$$

$$\nabla \mathrm{F}^{3D}(X) = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} \nabla I\left(X,\theta,\phi\right) \sin\theta \, d\phi \, d\theta \tag{9}$$

Obrovskou výhodou je, že frekvenční, časově velmi náročné integrace jsou provedeny předem a při vlastním řešení energetické bilance se značně zmenší nároky na strojový čas.

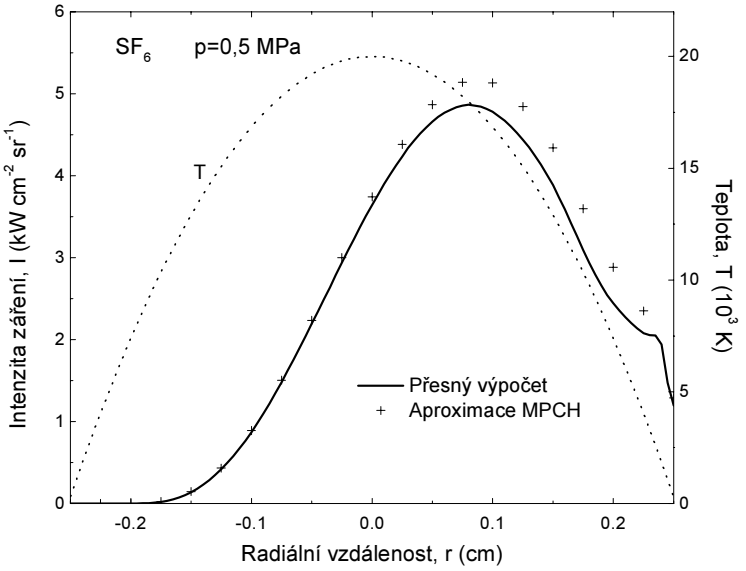
2.2 APLIKACE METODY PARCIÁLNÍCH CHARAKTERISTIK

Od roku 1992 se zabývám vývojem výše uvedené metody parciálních charakteristik a její aplikací na různé typy plazmatu. Hlavním úkolem je připravit podklady pro výpočet hlavních veličin přenosu energie zářením, tj. intenzity záření, toku záření a divergence toku záření jako funkce radiální vzdálenosti plazmatu v různých typech termálního plazmatu. Z teoretického hlediska se studují následující dílčí problémy:

1. Složení plazmatu jako funkce tlaku a teploty.
2. Výpočet spojitého spektra záření v plazmatu s respektováním fotorekombinace a brzdného záření.
3. Výpočet diskrétního spektra plazmatu s respektováním všech výrazných spektrálních čar, jejich spektrálního profilu, rozšíření i posuvu.
4. Výpočet koeficientu absorpce v plazmatu jako funkce frekvence záření, teploty a tlaku v plazmatu.
5. Výpočet parciálních charakteristik daného typu plazmatu.

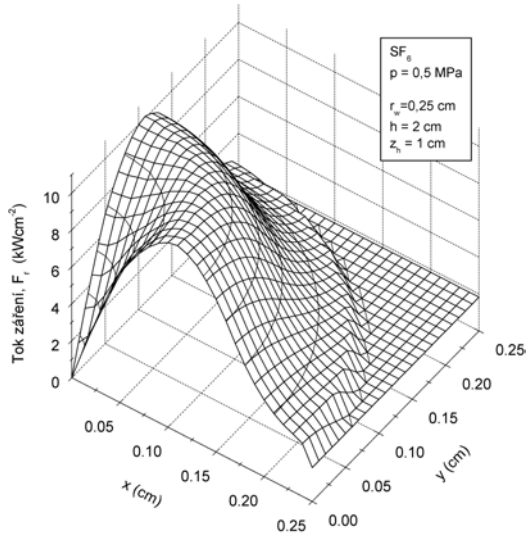
Výsledkem výpočtů jsou datové soubory obsahující parciální charakteristiky pro plazma různých plynů při různých teplotách, tlacích a charakteristických rozměrech plazmatu. Parciální charakteristiky se pak následně používají pro stanovení množství energie, které je z plazmatu vyzařováno a následně pohlceno v okolním prostředí. Tímto způsobem je možné stanovit radiační transport energie při řešení složitých problémů dynamiky proudění plazmatu. Je totiž relativně jednoduché implementovat metodu parciálních charakteristik do komerčních CFD programů, které se používají pro modelování proudění kapalných a plynných látek.

Na obr. 24 je provedeno srovnání výpočtu intenzity záření počítané „přesným“ vztahem s přímou integrací přes frekvenci záření podle rovnice (1) (plná čára) a metodou parciálních charakteristik podle první části na pravé straně rovnice (4) (křížky). Chyba aproximace nepřesahuje 20 %, což je při těchto druzích výpočtů naprosto postačující hodnota. Obrovský rozdíl je však v době výpočtu. Zatímco výpočet jednoho bodu plné křivky, tedy při přímé integraci, trvá řádově hodiny, u metody parciálních charakteristik se jedná o zlomky sekundy. Rozdíl v době výpočtu tedy činí až 4 řády. To má nesmírný význam při implementaci metody parciálních charakteristik do složitých modelů pro výpočet proudění plazmatu.

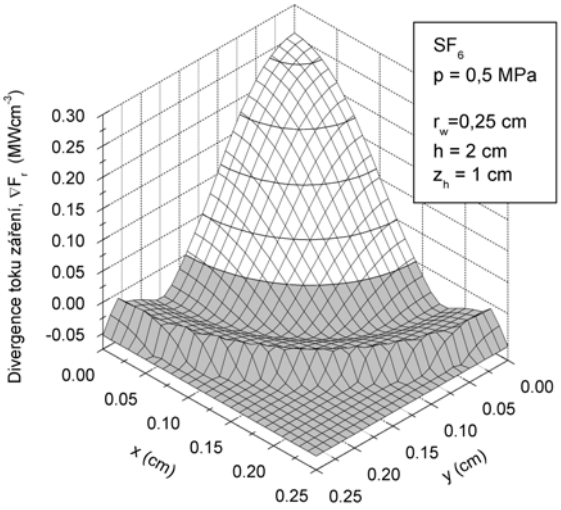


Obr. 24: Srovnání výpočtu intenzity záření v plazmatu SF_6 přímou integrací přes frekvenci záření a metodou parciálních charakteristik (MPCH)

Další výhodou metody je, že použití datových souborů funkcí *Som* a ΔSim umožňuje řešit přenos energie zářením v plazmatu nejen s jednoduchou symetrií, ale v podstatě s libovolnou prostorovou geometrií. Na obr. 25 a 26 jsou ukázky výpočtu radiálního průběhu toku a divergence toku záření pro plazma SF_6 při tlaku 0,5 MPa.



Obr. 25: Radiální průběh toku záření ve válcovém plazmatu SF_6 při tlaku 0,5 MPa



Obr. 26: Radiální průběh divergence toku záření v plazmatu SF_6 při tlaku 0,5 MPa

V řadě případů je třeba modelovat procesy záření ve vícesložkovém plazmatu. Typickým případem je spínací oblouk ve vypínačích s fluoridem sírovým, kde se v plazmatu plynu SF_6 mohou vyskytovat i další složky, typicky měď vypařovaná z kontaktů nebo teflon (PTFE), který se uvolňuje z izolační trysky. Pro tyto případy jsou třeba tabulky parciálních charakteristik respektující i tato složení plazmatu. Do dnešní doby jsem ve spolupráci s Dr. Bartlovou z Ústavu fyziky FEKT VUT v Brně zpracoval datové soubory parciálních charakteristik pro následující typy plazmatu a jejich parametry:

SF_6	tlaky 0,1 až 6 MPa
SF_6 + PTFE	tlaky 0,5 až 5 MPa pro tyto poměry koncentrací:
	100 % SF_6 — 80 % SF_6 + 20 % PTFE
	75 % SF_6 + 25 % PTFE — 60 % SF_6 + 40 % PTFE
	50 % SF_6 + 50 % PTFE — 40 % SF_6 + 60 % PTFE
	25 % SF_6 + 75 % PTFE — 20 % SF_6 + 80 % PTFE
	100 % PTFE
SF_6 + Cu	tlaky 0,1 a 0,5 MPa pro tyto poměry koncentrací:
	90 % SF_6 + 10 % Cu
	95 % SF_6 + 5 % Cu
	99 % SF_6 + 1 % Cu
Ar	tlaky 0,1 až 1 MPa

Dále připravujeme výpočet pro vodní a vzduchové plazma.

Datové soubory parciálních charakteristik jsou velmi žádané a používá je řada odborníků zabývajících se fyzikou plazmatu. Námi vypočtené parciální charakteristiky si vyžádala tato pracoviště: RWTH Aachen, ABB Baden – Corporate Research, Korea Electrotechnology Research Institute.

Parciální charakteristiky plazmatu SF_6 byly rovněž použity při simulacích vypínacího procesu ve vypínači s SF_6 s vlastní zhášecí energií (RWTH Aachen). Bylo dosaženo téměř 90% shody s experimentálními měřeními na prototypových zařízeních. Ukázalo se tedy, že v budoucnu by mohlo být možné nahradit finančně velmi náročné prototypové zkoušky VN vypínačů počítačovými simulacemi „na stole“.

3 VÝUKA PLAZMATU NA FEKT VUT V BRNĚ

V první části přednášky jsem se snažil ukázat, jak moc jsme obklopeni produkty plazmových technologií, jak moc ovlivňuje plazma náš každodenní život. Plazma tvoří 99 % procent známého vesmíru – i to by mohl být jeden z důvodů, proč je třeba mít alespoň základní vědomosti o plazmatu a jeho vlastnostech. Bohužel stále existuje velká skupina studentů, kteří na otázku „*Co je to plazma?*“, vymyslí obligátní odpověď: „*Plazma je čtvrté skupenství hmoty*“, což jsou veškeré jejich znalosti o plazmatu. Ve studijních programech inženýrského studia Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií byl donedávna dán velmi malý prostor pro seznámení studentů se základy fyziky plazmatu. Ucelené informace o plazmatu mohli studenti získat v podstatě až v postgraduálním studiu. Tato situace by se mohla v příštích letech změnit, protože stávající studijní programy obsahují nový kurz s názvem „Fyzika a diagnostika plazmatu“, jehož jsem garantem. Tento kurz bude v nabídce pro studenty magisterského studia.

V kurzu budou probírány následující kapitoly:

- Charakteristika plazmatického stavu.
- Generování plazmatu.
- Plazma elektrických výbojů.
- Plazma jako měnič energie (MHD generátory, přímá přeměna tepla v elektrickou energii).
- Plazma jako zdroj záření, plazmové zdroje světla, nízkotlaké a vysokotlaké výbojky, plynové lasery, plazmové displeje.
- Plazma jako pracovní prostředí (obrábění materiálu plazmatem, elektrické čištění plynu).
- Plazma jako zdroj částic (zdroje iontů a rychlých neutrálních částic).
- Plazma jako zdroj pohybu (iontové a plazmové pohony).
- Plazma jako elektrický vodič.
- Termojaderné reakce.

Cílem kurzu bude seznámit studenty se základními vlastnostmi vysokoteplotního a nízkoteplotního plazmatu a jeho technologickým využitím v praxi. Studenti by se měli dozvědět o nejnovějších poznatcích z oblasti moderních plazmových technologií, o vybraných metodách diagnostiky plazmatu ve zhášecích komorách spínacích přístrojů, o plazmatronech a jiných zařízeních s plazmatem. Seznámí se s metodami a technickými prostředky pro stanovení vlastností plazmatu pro technologické využití v technické praxi.

ZÁVĚR

Rychlý rozvoj vědy, techniky i technologií výroby si vynucuje v souladu s cílem výchovně vzdělávací práce modernizaci obsahu, metod a prostředků vzdělání tak, aby lépe než dosud vyhovovaly požadavkům na ně kladeným. Ve fyzice jako jedné z vůdčích přírodovědných disciplín se to projevuje zejména jako modernizace fyzikálního vzdělání. Konkrétně to znamená seznamovat studenty se současným fyzikálním obrazem světa.

Pokud tato přednáška přispěje alespoň k rozšíření všeobecného povědomí v tom smyslu, že pod pojmem „plazma“ rozumíme nejenom krevní plazmu v biologii nebo lékařství, ale i ionizovaný plyn s bohatým využitím v technické praxi, pak lze konstatovat, že splnila svůj účel.

Tato práce vznikla za podpory MŠMT (projekt MSM 262200010) a GAČR (projekt GA202/02/1027).

POUŽITÉ ZDROJE

AUBRECHT, V.: Radiační transport energie v plazmatu elektrického oblouku. Habilitační práce. Brno, PřF MU, 1998, 145 s.

AUBRECHT, V., GROSS, B.: Net Emission Coefficient of Radiation in SF_6 Arc Plasma. Journal of Physics D. Applied Physics, 1994, vol. 27, pp. 95–100.

AUBRECHT, V., LOWKE J. J.: Calculations of Radiation Transfer in SF_6 Plasmas Using the Method of Partial Characteristics. Journal of Physics D. Applied Physics, 1994, vol. 27, pp. 2066–2073.

BOULOS, M. I., FAUCHAIS, P., PFENDER, E.: Thermal Plasmas. Fundamentals and Applications. Volume I. New York, Plenum Press, 1994. ISBN 0-306-44607-3.

CHEN, F. F.: Úvod do fyziky plazmatu. Praha, Academia, 1984.

GROSS, B.: Základní vlastnosti plazmatu a jeho aplikace. In Nové trendy ve fyzice. Sborník příspěvků konference, 2. díl, Brno, 15. a 16. listopadu 2001, s. 258–274. ISBN 80-214-1992-X.

KUBEŠ, P.: Řízená termonukleární fúze v roce 2001. In Nové trendy ve fyzice. Sborník příspěvků konference, 2. díl. Brno, 15. a 16. listopadu 2001, s. 281–287. ISBN 80-214-1992-X.

LIEBERMANN, R. W., LOWKE, J. J.: Radiation emission coefficients for sulfur hexafluoride arc plasmas. Journal of Quantitative Spectroscopy and Raditive Transfer, 1976, vol. 16, pp. 253–264.

STACH, V.: Plazma – čtvrté skupenství hmoty. Praha, SPN, 1988.

Internet: např. www.plasmas.org., www.plasmacoalition.org, www.bmbf.de, www.zcu.cz

ABSTRACT

Plasmas underlie numerous important technological applications and devices as well as our understanding of much of the universe around us. Research in this field opens doors to promising, ecologically efficient and integrative solutions and will contribute to satisfying future needs in terms of resources and environmentally friendly processes and products.

In contrast, the public awareness of plasma technology remains at a very low level. The present publication is thus intended to give readers an overall grasp of what plasma technology is and can achieve. It aims to give an overview of the possibilities in various areas of application and of the potential for new products, energy saving, environmental protection, and job creation. Furthermore, it describes the role and significance of plasma technology and existing successful applications of plasmas, while also indicating promising areas for future activities. The choice of topics can, of course, be neither complete nor conclusive. Plasma technology is a technology of the future, a technology that can make an important contribution to sustainable growth, innovation, and new products.

The first chapter of the paper deals with basic properties of plasmas and utilization of the plasma technology in an industry. Author's contribution to the understanding of plasma processes is presented in the second chapter. Mathematical modeling of radiative heat transfer in thermal plasmas is dealt with. Last chapter is devoted to the teaching of the plasma physics at the Faculty of Electrical Engineering and Communication in Brno.