



UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za matematiko in fiziko
Oddelek za fiziko

PLAZMA

Katarina MRAMOR

Mentor: dr. PRIMOŽ ZIHERL

Ljubljana, maj 2007

POVZETEK

V seminarju so opisane so značilnosti plazme. Podani so primeri naravne in umetne plazme. Razložen je princip njenega nastanka, zraven pa so podane ionizacijske energije plinov, ki jih uporabljamo za proizvodnjo umetne plazme. Na koncu seminarja so predstavljene možnosti uporabe plazme in delovanje najbolj pogosto uporabljenih aplikacij.

1 UVOD

Beseda plazma ima več pomenov. V medicini in biologiji s tem izrazom označimo eno izmed sestavin krvi - krvno tekočino. V fiziki in kemiji je plazma eno izmed osnovnih stanj snovi.

Izven Zemljine atmosfere je plazma prevladujoča snov, saj poleg zvezd in prostora med njimi sestavlja kar 99 % vidnega vesolja [1], verjetno pa tudi velik del tistega česar, ne vidimo. Na Zemlji lahko plazmo v naravi opazimo v ognju in pri pojavih, kot sta strela in severni sij. Umetno proizvedeno plazmo danes uporabljamo v fluorescenčnih žarnicah, plazma televizorjih in fuzijskih napravah, kjer jo je potrebno omejiti z magnetnim poljem.

Plazma je plin sestavljen iz nabitih delcev; prostih elektronov in ionov. Izvori energije, ki je potrebna za odcepitev elektrona z atoma oziroma z molekule, so lahko termični, električni ali svetlobni (ultravijolična svetloba, intenzivna vidna svetloba iz laserja). Če je moč izvora premajhna, se plazme rekombinirajo nazaj v nevtralen plin. Plazmo največkrat vidimo kot oblak nevtralnega plina (npr. zvezde, meglice) ali kot nabit ionski žarek, ki lahko vsebuje tudi prašne delce in zrna. Takrat govorimo o t.i. prašnih plazmah.

Prvi je novo osnovno stanje snovi odkril angleški fizik Sir W. Crookes leta 1879. Leta 1929 je I. Langmuir novo agregatno stanje poimenoval plazma [2]. Ime si je sposodil iz medicine, ker ga je snov, s katero je delal, spominjala na krvno tekočino.

V vesolju je plazma sestavljena le iz ionov in elektronov. Šele ko se plazma dovolj ohladi, lahko nastanejo atomi in molekule, ki so potrebne za nastanek plinov, kapljev in trdnin. V vesolju torej plazma ostane električno nabita in lahko prevaja električni tok. Na plazmo zato veliko bolj vpliva magnetno polje kot gravitacija. Z električnim in magnetnim poljem lahko plazmo pospešimo, kar nam omogoča, da jo kontroliramo in uporabimo v praktične namene, kot so pridobivanje energije, nove obdelovalne tehnike in uporabniški izdelki.

Pri ločevanju elektronov in ionov nastane električno polje, gibanje elektronov in ionov pa povzroči tako nastanek magnetnega kot tudi dodatnega električnega polja. Zaradi prisotnosti električnega polja se nabiti delci v plazmi pospešujejo do zelo visokih energij. Magnetno polje delce usmerja. Oba mehanizma (pospeševanje in magnetno polje) povzročita sinhrotronsko sevanje. Zaradi samoohranjalnega gibanja se v plazmi pojavljajo nestabilnosti ter kaotična in nelinearna gibanja. Zaradi njih nastajajo električna in magnetna polja in hkrati tudi elektromagnetno sevanje npr. mikrovalovi.

Raziskovanje plazme nam omogoča boljše razumevanje vesolja, ter obenem odpira nova področja v znanosti. Fiziki, ki se ukvarjajo z raziskovanjem plazme, so bili namreč med prvimi, ki so odprli in razvili novi področji kaosa in nelinearne dinamike.

2 ZGODOVINA

Prvi je plazmo opazil Sir W. Crookes leta 1879, ko je opazoval razelektritev v razredčenih plinih [3]. Opazil je, da se je temen prostor okoli elektrode povečal, če se je povečala atenuacija plina, katodni žarki pa so še vedno izhajali iz elektrode. Proučeval je naravo teh žarkov in ugotovil, da potujejo v ravnih linijah, povzročajo fluorescenco na objektih, ob katere trčijo, hkrati pa se ob njihovem trku sprošča toplota. Verjel je, da je odkril novo agregatno stanje snovi, ki ga je poimenoval sevajoča snov.

Prvi je leta 1897 pravilno razložil njegova opažanja britanski fizik Sir J. J. Thompson [3], ki je dokazal, da so katodni žarki sestavljeni iz negativnih elektronov. Izraz plazma je za ioniziran plin prvi uporabil I. Langmuir, ker ga je snov spominjala na krvno tekočino. V čem je videl podobnost, ni natanko znano, obstajata pa dve razlagi [4]. Prva pravi, da je podobnost v tem, da tako krvna plazma kot tudi ioniziran plin prenašata delce, druga se nanaša na izvor besede, ki naj bi v grščini pomenila "prilagoditi se", saj se plazma prilagodi obliki "cevi", v kateri se nahaja. Ioniziran plin je bil z imenom plazma prvič omenjen v Langmuirjevi publikaciji "Oscillations in Ionized Gases" leta 1928 [4].

3 PARAMETRI IN LASTNOSTI PLAZME

3.1 Definicija plazme

Plazmo lahko v grobem opišemo kot makroskopsko nevtralen plin, ki je sestavljen iz pozitivno in negativno nabitih delcev. Bolj natančna definicija pa zahteva, da veljajo naslednji kriteriji [2]:

- Vsak izmed nabitih delcev mora biti dovolj blizu svojim sosedom, da vpliva na čim večje število bližnjih nabitih delcev. Približek je dober, če plazma zasenči vsako področje z dodatnim prostorskim nabojem na karakteristični razdalji — Debyeovi dolžini [5].
- Debyeova dolžina mora biti majhna v primerjavi s fizično velikostjo plazme, da lahko zanemarimo robne efekte.
- Plazemska frekvenca mora biti majhna v primerjavi s frekvenco trkanja elektronov ob nevtralne delce. Ko je ta pogoj izpolnjen, plazma senči naboj; pojavijo se kvazinevtralna območja, ki so značilna za plazmo.

3.2 Parametri plazme

S parametri plazme [6] definiramo njene glavne karakteristike. Med pomembnejšimi parametri so ciklotronska frekvenca ω_c :

$$\omega_c = \frac{eB}{mc} \quad (1)$$

in plazemska frekvenca ω_p :

$$\omega_p = \sqrt{\left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}\right)}, \quad (2)$$

Debyeova dolžina λ_D [7]:

$$\lambda_D = \sqrt{\left(\frac{k_B T}{4\pi n e^2}\right)} \quad (3)$$

in število delcev v Debyeovi sferi n_D [6]:

$$n_D = \frac{4\pi}{3} n \lambda_D^3. \quad (4)$$

Tu je e osnovni električni naboj, B gostota magnetnega polja, m je masa nabitega delca, c je svetlobna hitrost, n_e pa število elektronov. Z m_e je označena masa elektronov, s k_B Boltzmanovo konstanto, T je temperatura in n število delcev.

Plazma pokriva območje od mikroskopskih pa vse do makroskopskih ali kozmičnih skal [6]. Velikost plina [6], ki sestavljajo plazmo, pokriva območje od 10^{-4} m pa vse do 10^{16} m (tabela 1). Številna gostota plazme [6] pokriva območje od $\approx 10^{-9}/\text{m}^3$ pa vse do $10^{18}/\text{m}^3$ (tabela 1). Gostota [8] se razteza na območju od $10^{-30} \text{ kg}/\text{m}^3$ do $10^{13} \text{ kg}/\text{m}^3$. Največja gostota se pojavi na najmanjši skali v kvark-gluonski plazmi, kjer elektromagnetno silo nadomesti močna. Termična energija [6] obsega območje skoraj od absolutne ničle, ki ga dosegajo kristalna stanja ne-nevtralne laboratorijske plazme, pa do več kot 10000 keV (tabela 1). Na sliki 1 je prikazan širok razpon vrednosti v prostoru temperature in številske gostote za nekatere primere plazme. Magnetna polja [7] pokrivajo široko območje od 10^{-9} T pa do več kot 10^6 T (tabela 1). Življenski čas plazme [8] traja od nekaj ps pa vse do neskončnosti.

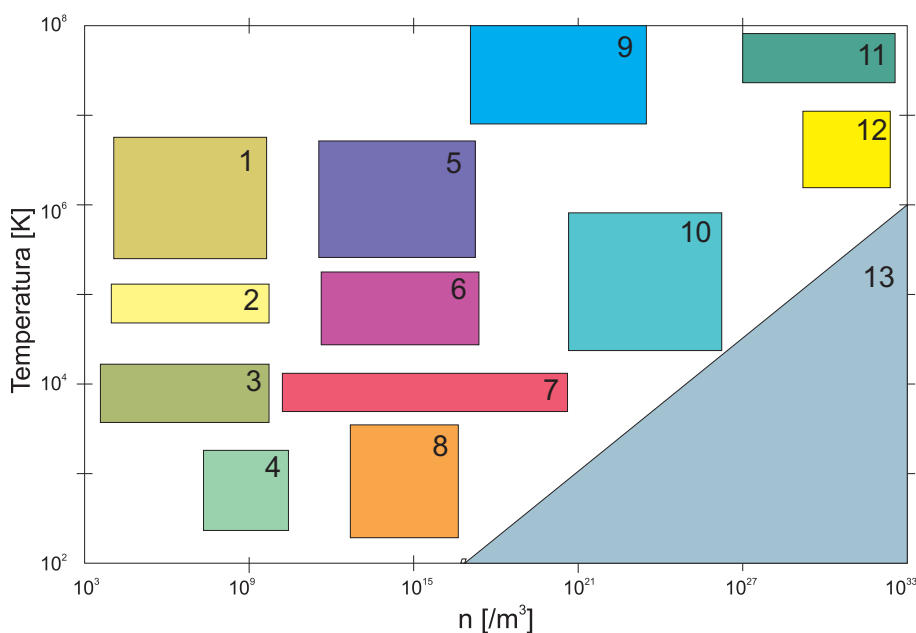
3.3 Stopnja ionizacije

Izraz gostota plazme se ponavadi nanaša na gostoto elektronov v plazmi, ki je definirana kot število elektronov na enoto volumna. Stopnja ionizacije [6] je odvisna predvsem od temperature in je navadno višja, če je temperatura višja, ker imamo več ioniziranih delcev. Stopnja ionizacije η je razmerje med številom atomov, ki so izgubili (zajeli) elektron, in vsoto števil nevtralnih atomov in ionov:

$$\eta = \frac{n_i}{n_i + n_a}, \quad (5)$$

	l (m)	n_e (m^{-3})	$k_B T$ (eV)	λ_D (m)	B (T)
ionosfera	10^5	10^{12}	0.03 — 0.1	0.003 — 0.002	10^{-5}
sončeva fotosfera	$5 \cdot 10^8$	10^{20}	1	$5 \cdot 10^{-6}$	
sončna korona	$10^9 — 10^{10}$	$10^{10} — 10^{14}$	100	0.01 — 1	10^{-3}
medplanetarni prostor	10^{16}	$10^3 — 10^6$	0.01 — 1	1 — 10^2	10^{-9}
razelektritev (nizek tlak)	0.01	10^{17}	3 — 7	$3 \cdot 10^{-5}$	
razelektritev (visok tlak)	0.001	10^{23}	0.5 — 1	10^{-9}	
tokamak	0.2	$5 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-5}$	10
ICF	0.0001 — 0.01	10^{-28}	10^4	$7 \cdot 10^{-9}$	

Tabela 1: Velikostna skala, ki jo plazma zavzema v vesolju in na Zemlji s primeri [6], [7]. Tu je l karakteristična velikost oziroma radij plazme, n_e število elektronov v plazmi, $k_B T$ termična energija plazme in λ_D Debyeova dolžina.



Slika 1: Na sliki je prikazan širok razpon vrednosti v prostoru številske gostote in temperature, ki jih zavzema plazma [6]. Od leve proti desni si sledijo magnetni meglica (1), sončni veter (2), medzvezdni prostor (3), aurora ali polarni sij (4), sončeva korona (5), neonski napis (6), fluorescentna svetila (7), plamen (8), fuzijski reaktor (9), strele (10), znotraj omejena fuzija (11) in sončevo jedro (12). Območje desno spodaj (13) je prehladno in pregosto, da bi tam lahko nastala plazma. To je območje plinov, kapljev in trdnin.

kjer je n_i številska gostota ionov in n_a število nevtrálnih atomov. Številsko gostoto elektronov n_e dobimo, če številsko gostoto ionov pomnožimo s povprečnim vrstnim številom Z :

$$n_e = \langle Z \rangle n_i. \quad (6)$$

3.4 Temperatura

Temperaturo plazme ponavadi izražamo v eV oziroma v K in nam pove, kolikšna je toplotna kinetična energija na delec. Ker so elektroni v večini primerov v ravnovesju ali blizu slednjega, je temperatura dobro definirana tudi, kadar energijska porazdelitev močno odstopa od Maxwelllove. Do odstopanj pride zaradi ultravijoličnega sevanja in močnih magnetnih polj. Zaradi majhne mase elektroni veliko hitreje dosežejo

ravnovesje, kadar zraven ni veliko težjih ionov in nevtralnih atomov. To je tudi vzrok, zakaj imajo ioni in elektroni v plazmi lahko različno temperaturo. Le-ta je za ione in nevtralne atome nižja. Ta pojav je pogost zlasti pri šibko ioniziranih laboratorijskih plazmah, za katere je značilno, da imajo ioni sobno temperaturo.

Plazmo lahko glede na temperaturo ionov in elektronov razdelimo v dve skupini: termično in netermično. O termični plazmi govorimo, kadar imajo elektroni in težji delci enako temperaturo in so v termičnem ravnovesju. Netermična plazma pa je plazma, pri kateri imajo ioni in nevtroni veliko nižjo temperaturo kot elektroni. Ioni in nevtralni delci imajo v netermični plazmi temperaturo, ki je blizu sobni.

Temperatura v plazmi določa stopnjo ionizacije, ki je podana kot relativna temperatura elektronov glede na ionizacijsko energijo in gostoto in jo lahko zapišemo s pomočjo Sahove enačbe⁴. Glede na stopnjo ionizacije ločimo visoko- in nizektemperaturne plazme. Visokotemperaturna plazma je plazma, pri kateri je velika večina plina ioniziranega, nizektemperaturna plazma pa je plazma, pri kateri je ioniziran le majhen delež plina (1 %). Kljub majhni stopnji ionizacije lahko elektroni v nizektemperaturni plazmi dosežejo temperature nekaj 1000 K. V tabeli 2 so navedene ionizacijske temperature za nekaj osnovnih elementov.

Najnižja temperatura plazme, ki jo lahko dosežemo na Zemlji, je ≈ 0 K v kristaliziranih ne-nevtralnih plazmah. Najvišjo temperaturo doseže plazma v magnetnih fuzijskih reaktorjih in znaša 10^8 K. Za primerjavo povejmo, da znaša temperatura plazme v sončnem jedru 10^7 K.

element	prva ionizacijska energija [eV]	druga ionizacijska energija [eV]
argon	15.7	27.76
živo srebro	10.3	
neon	21.4	
kisik	13.6	34.93
natrij	5.1	47.0
krom	6.7	16.6

Tabela 2: Tabela ionizacijskih energij nekaterih elementov; energija 1 eV ustreza temperaturi 11600 K.

3.5 Magnetizacija

Če je magnetno polje v plazmi dovolj močno, pravimo, da je plazma magnetizirana. Polje v plazmi je dovolj močno, če delec vsaj enkrat zaokroži preden se zaleti v drug delec. Magnetne plazme so anizotropne, kar pomeni, da so lastnosti plazme v smeri vzdolž magnetnega polja drugačne od lastnosti plazme v smeri pravokotno na magnetno polje. Pogosto se zgodi, da se elektroni namagnetijo, ioni pa ne.

4 VRSTE PLAZME

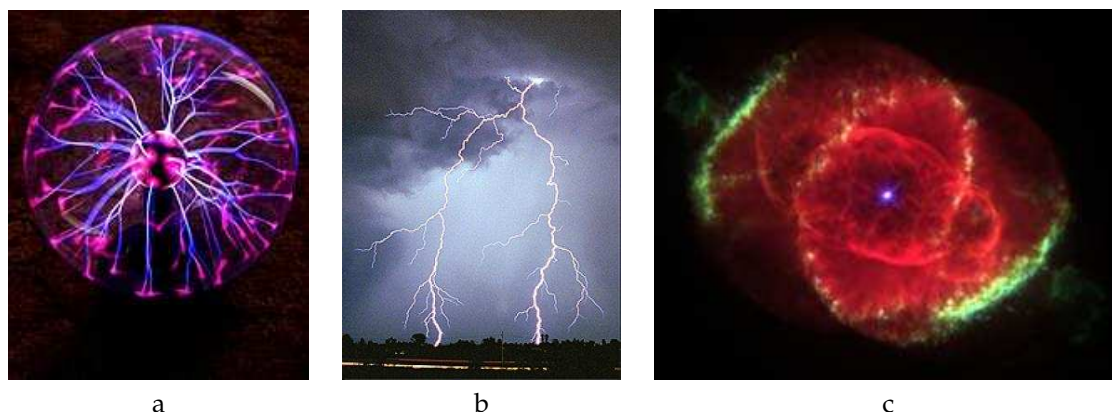
Plazmo lahko po nastanku razdelimo v dve veliki skupini: naravne in umetne. Naravne lahko zopet razdelimo v dve skupini in sicer na plazme, ki nastanejo na Zemlji oziroma v njeni atmosferi, in na tiste, ki nastanejo v vesolju.

Večina snovi v vidnem vesolju, po nekaterih ocenah do 99 % [9], je v četrtem ali plazemskem agregatnem stanju. Plazma, ki je nastala v vesolju, vključuje Sonce, večino zvezd in velik del medzvezdnega prostora. Fizika plazme se med drugim ukvarja s proučevanjem radiacijskih pasov, razvojem sončnih peg in izbruhi na Soncu, s sončnim vetrom in s pospeševanjem kozmičnih delcev ter z drugimi astrofizikalnimi objekti in pojavi. Na sliki 2 so prikazani primeri umetne in naravne plazme na Zemlji in v njeni atmosferi ter plazme, ki nastane v vesolju.

⁴Enačbo Saha [7] za ionizacijsko ravnovesje zapišemo kot:

$$\frac{N_+}{N_0} = A(k_B T)^{3/2} N_e^{-1} \exp(-\chi_0/k_B T), \quad (7)$$

kjer je N_+ število ionov na enoto prostornine, N_0 število nevtralnih atomov na enoto prostornine, in N_e število elektronov na enoto prostornine. T je temperatura v K, k_B je Boltzmannova konstanta, χ_0 predstavlja ionizacijsko energijo nevtralnega atoma, A pa je konstanta.



Slika 2: Na slikah so prikazani primeri vrste plazem. Na sliki a) je plazemska luč [10]. Različne barve so posledica relaksacije elektronov iz vzbujenih v nižje energijske stanja. Slika b) prikazuje strele [11], ki so primer plazme v zemeljni atmosferi. Na sliki c) je prikazana meglica "cat's eye" [12], ki je primer plazme v vesolju.

V zemeljni atmosferi nizka temperatura in konstantno visok tlak nista ugodna za nastanek plazme, zato le-ta nastane le v posebnih primerih. Najbolj pogost pojav so strele, pri katerih pride do razelektritve, zaradi česar se atmosferski plini ionizirajo in zaradi električnih tokov (30 - 50 kA) segrejejo do visokih temperatur (28000 K). Zanimiv in dokaj pogost je tudi pojav polarnega sija (aurora), do katerega pride zaradi vdora nabitih delcev v atmosfero.

Najbolj znani aplikaciji umetne plazme sta plazemska luč in neonski znaki, najbolj koristna pa zagotovo proizvodnja energije v fuzijskih reaktorjih. V tabeli 3 je podanih nekaj primerov za vsako vrsto plazme.

umetne plazme	naravne plazme	
	Zemlja	vesolje
plazemski televizijski zaslon	strele	Sonce in večina drugih zvezd
fluorescentne svetilke, neonski znaki	kroglaste strele	sončni veter
raketni izpuh	ionosfera	medplanetarna, medzvezdna in med galaktična snov
fuzijska energija	polarni sij	akrecijski diski
plazemski rezalniki	ogenj Sv. Elma	medzvezdne meglice
plazma, ki se uporablja za proizvodnjo integriranih vezij	ogenj	tokovna cev Jupitrove lune

Tabela 3: Vrste plazme ločimo na umetne in naravne, ki jih glede na kraj nastanka lahko zopet razdelimo v dve skupini, in sicer tiste, ki so nastale na Zemlji oziroma v njeni atmosferi, ter tiste, ki so nastale v vesolju. V tabeli je za vsako vrsto podanih nekaj primerov.

4.1 Ultrahladna plazma

S pomočjo laserske pasti lahko proizvedemo ultrahladno plazmo, pri kateri so nevtralni atomi ohlajeni na temperaturo manj kot 1 mK. Z drugim laserjem nato ioniziramo atom tako, da zunanjemu elektronu dovedemo ravno dovolj energije da lahko pobegne električnemu privlaku atoma. Na ta način lahko kontroliramo kinetično energijo pobeglega elektrona. S pulznim laserjem lahko dosežemo, da energija elektrona ustreza temperaturi 0.1 K^5 , medtem ko ioni ostanejo shlajeni na temperaturi nekaj mK.

⁵Temperatura 0.1 K je limita, določena s frekvenčno širino laserskega pulza.

4.2 Ne-nevtralna plazma

Z odcepitvijo elektronov z atomov in molekul dobimo nevtralno plazmo, saj moč in obseg električne sile ter dobra prevodnost v plazmi poskrbijo, da sta gostoti pozitivno in negativno nabitih delcev enaki na vsakem dovolj velikem področju. Temu pojavu pravimo kvazinevtralnost. Plazmi, ki ima na nekem področju višek pozitivnega ali negativnega naboja, pravimo ne-nevtralna plazma. V ekstremnih primerih je lahko sestavljena samo iz ene vrste nabitih delcev, npr. iz elektronov. Primeri ne-nevtralne plazme so nabiti žarki delcev, elektronski oblak, Penningova past in pozitronske plazme [13].

4.3 Prašna ali zrnata plazma

Prašna plazma [14] poleg elektronov ionov in nevtralnih atomov vsebuje tudi mikroskopsko velike nabite delce prahu. Najdemo jo v medplanetarnih oblakih prahu, kometih, planetarnih obročih, v aerosolih in v atmosferi.

V vesolju na prašne delce poleg gravitacije vpliva tudi sevalni tlak, če se le-ti nahajajo v bližini masivnejših objektov. Prašni delci v plazmi se lahko postanejo nabiti zaradi fotoionizacije, ultravijoličnega sevanja, sekundarne elektronske emisije, trkov s termičnimi ioni in elektroni ter zaradi absorpcije nabitih delcev. Zaradi naboja poleg gravitacijskega polja nanje vplivata tudi električno in magnetno polje. Plazma torej vpliva na prašne delce, ki jih prenaša. Obratno pa lahko tudi prašni delci vplivajo na plazmo, v kateri se nahajajo. Zaradi prašnih delcev lahko v plazmi nastanejo nove nestabilnosti, ki spremenijo obnašanje plazme.

Prašna zrna imajo negativen naboj, ker zbirajo elektrone iz okoliške plazme [15]. Fotoemisija zaradi ultravijoličnega sevanja in termična emisija zrn, segretil zaradi radioaktivnih izvorov, lahko povzročita, da se prašna zrna pozitivno nabijejo. Če je energija fotonov večja od fotoelektričnega dela prašnih zrn in manjša od ionizacijskega potenciala nevtralnih atomov, prašna zrna predstavljajo izvore ionizacije, če v bližini ni drugih virov. Pozitivno nabiti prašni delci obstajajo v zemljini mezosferi, v repih kometov in v medzvezdnih prašnih oblakih blizu svetlih zvezd. Na Zemlji se lahko radioaktivni prašni delci nabijejo pozitivno na robovih tokomaka zaradi razpada beta.

5 UPORABA IN APLIKACIJE

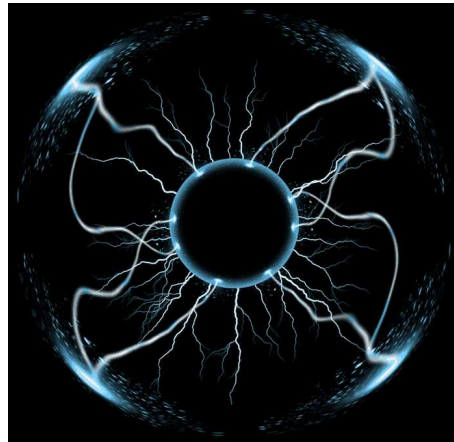
Danes se plazme uporabljajo na številnih področjih tehnologije. Glavno področje uporabe plazme je razvoj fuzijskega reaktorja [5], v katerem bomo pridobivali energijo s kontroliranim zlivanjem lahkih jeder. Plazmo uporabljamo v industriji za obdelavo materialov, v vsakdanjem življenju pa se njenimi aplikacijami srečujemo na vsakem koraku (fluorescenčne in neonske luči, plazma televizorji), uporablja pa se lahko celo za procesiranje hrane in razgradnjo oziroma reciklažo različnih odpadkov.

5.1 Plazemska krogla

Delovanje plazemske luči ali krogle lahko primerjamo z delovanjem kondenzatorja, ki ga polnimo oziroma praznimo z izmeničnim tokom. Plošči kondenzatorja sta v plazemski luči lahko tem bolj razmaknjeni, čim hitrejša so oscilacije toka in čim večja je napetost izvira. V plazemski luči namesto plošč uporabimo na eni strani majhno krogelno elektrodo znotraj steklene krogle, na drugi pa elektrodo, ki se nahaja kar znotraj izvora napetosti. Izolator predstavljajo zrak v krogli, steklena krogla in zrak zunaj krogle. Ko je električno polje med elektrodama dovolj močno, ionizira plina. Ioniziran plin je dober prevodnik električnega toka. Nekateri elektroni se med tem procesom vrnejo v osnovno ali nižje vzbujeno stanje, pri tem pa sevajo svetlobo. Kakšne barve je svetloba, je odvisno od plina, s katerim je napolnjena steklena posoda.

Plin v stekleni posodi postane še bolj prevoden, če v krogli znižamo tlak. To nam omogoči, da lahko elektrodi bolj razmaknemo, zaradi česar svetlobo lažje opazimo. Ker sta napetost in zato tudi električno polje med elektrodama dovolj velika, kondenzator konstantno prevaja tok. Plin med obema elektrodama je dovolj prevoden, da skozenj konstantno teče tok [16], če imamo v posodi napetost ≈ 2000 V, dovolj nizek tlak ($1/70$ bara), frekvenco $10000/s$, plošči pa morata biti razmaknjeni za nekaj centimetrov. Skozi kroglo torej teče konstanten tok, zato bi morala biti tudi intenziteta svetlobe približno konstantna. Vendar ni tako. Majhne variacije v temperaturi plina povzročijo, da je plin v nekaterih odsekih bolj prevoden. Tok lažje steče

skozi območje, ki ima manjšo upornost, zato teče skozi toplejša območja, ki se še bolj segrejejo. Ker skozi takšne tokovnice steče več toka, so te tokovnice svetlejšje, kar se lepo vidi tudi na sliki 3.



Slika 3: Slika prikazuje plazemsko luč [16], ki je primer uporabe umetne plazme v vsakdanjem življenju.

V plazemski luči dobimo večje število barv, če povečamo število plinov, ki se nahajajo v njej. Vsak izmed njih namreč sveti v svoji karakteristični svetlobi. V plazemskih svetilkah so najbolj pogosto uporabljeni plini argon, neon in dušik, svetijo pa v modri, rdeči in beli barvi.

V plazemskih kroglah se tokovnice vedno gibljejo proti vrhu sfere. Ta pojav je posledica dviganja segretega zraka. Ko skozi del zraka steče električni tok, se zrak na tem mestu segreje in ker je toplejši od okolice, se začne dvigati.

Zanimiv je tudi pojav debelejših svetlobnih tokovnic, če se krogle dotaknemo z roko. Vzrok je kapacitivna sklopitev. To je mehanizem, pri katerem lahko električno polje med seboj sklopi dve strani tokokroga skozi plošči kondenzatorja. Sposobnost shranjevanja naboja na kondenzatorju se zato spremeni, ker se je spremenil tudi material med njima. Če se torej s prstom dotaknemo plazemske luči, povečamo sposobnost prevajanja električnega toka na danem mestu. Okoli mesta, kjer se s prstom dotaknemo steklene plošče, je zato rahlo močnejše električno polje, kar pomeni, da tok tam lažje teče skozi, zato tudi tokovnice bolj žarijo.

5.2 Fluorescentna svetilka

Fluorescentna svetilka je svetilka, ki za nastanek svetlobe izkorišča razelektritev plina. Pospešeni elektron se znotraj cevi svetilke zaleti v atom plina, zaradi česar elektron plina preide v vzbujeno stanje, pri čemer absorbira del kinetične energije, ki jo je prejel med trkom. Visokoenergijsko stanje je nestabilno, zato se elektron sčasoma vrne v nižji nivo, ki je stabilen. Pri tem izseva foton, katerega valovna dolžina sega v ultravijolični del spektra in ga zato ne vidimo. Izsevano svetlobo bi radi pretvorili v vidno svetlobo. To naredimo s fluorescenco.

Fluorescenca se pojavi na notranjem delu cevi, ki je prevlečena s fosforjem. Atomi fosforja absorbirajo ultravijolično svetlobo, pri čemer preidejo v višje stanje, ki seveda ni stabilno, zato kmalu padejo nazaj na nižji nivo pri tem pa izsevajo foton v vidni svetlobi. Razlika energij prejetega in oddanega fotona se pretvori v termično energijo.

Na sliki 4 je prikazanih nekaj različnih aplikacij fluorescentnih žarnic.

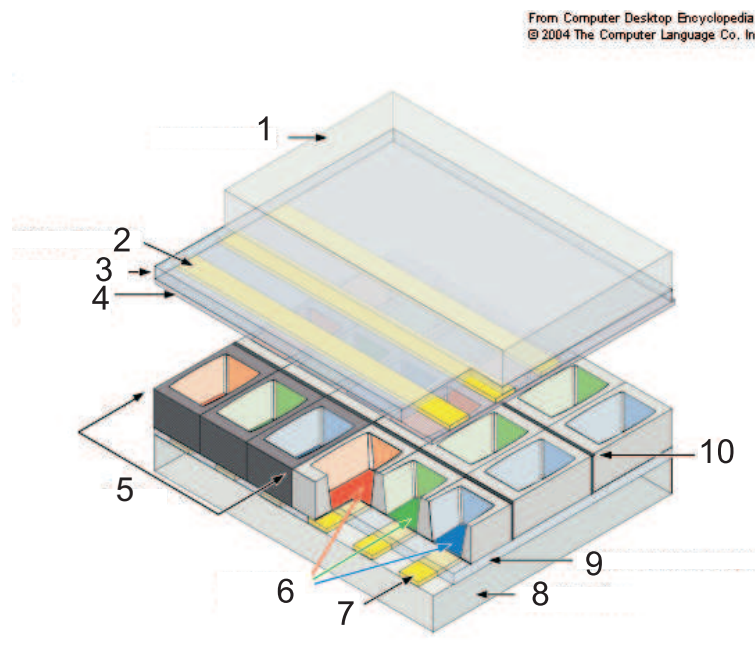
5.3 Plazemski zaslon

Neon in ksenon v plazemskih televizorjih sta shranjena v velikem številu majhnih celic, ki so postavljen med dvema steklenima ploščama. Na vsaki strani celic sta postavljeni dolgi elektrodi. Naslovne elektrode se nahajajo za celicami vzdolž spodnje steklene plošče [18]. Nad celicami so vzdolž zgornje steklene plošče postavljene prozorne zaslonske elektrode, ki so obdane z izolacijskim dielektričnim materialom in prekrite z zaščitno plastjo magnezijevega oksida.



Slika 4: Na sliki so prikazane različne aplikacije fluorescenčnih žarnic [17].

Obe vrsti elektrod se raztezata vzdolž celotnega zaslona. Zaslonske elektrod so razporejene v vodoravnih vrsticah vzdolž ekrana, medtem ko so naslovne elektrode razporejene v navpičnih stolpcih. Vodoravne in navpične elektrode tako tvorijo osnovno mrežo (slika 5).

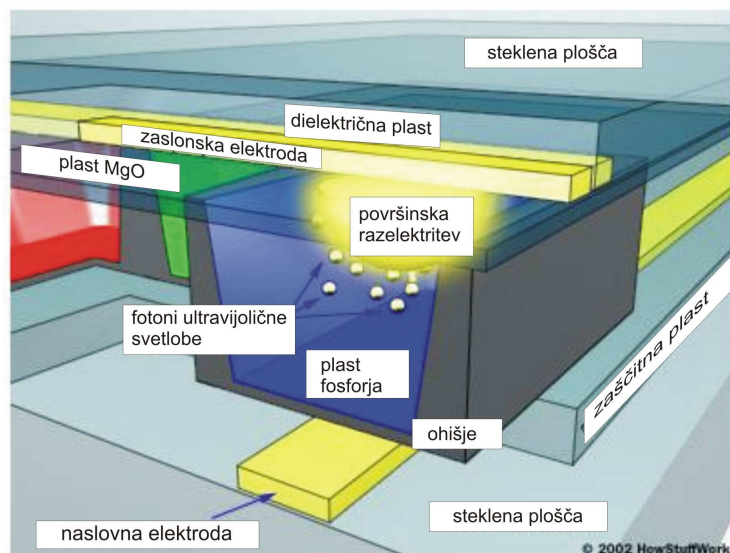


Slika 5: Sestava plazemskega zaslona. Zaslon sestavljata zgornja (1) in spodnja steklena plošča (8), celice (10) napolnjene s fosforjem (6), zaslonske (2) in naslovne elektrode (7), spodnja zaščitna plast (9) in magnezijeva zaščitna plast (4) ter dielektrična plast (3). Piksel je sestavljen iz treh celic (5) [18].

Ionizacijo plina v posamezni celici nadziramo z računalnikom, ki poskrbi, da se elektrodi, ki se križata na neki celici, nabijeta. Ko sta prekrížani elektrodi nabiti (med njima je napetostna razlika), steče skozi plin v celici električni tok, ki povzroči hiter pretok nabitih delcev. Tok vzbudi atome plina, ti pa pri nato izsevajo fotone ultravijolične svetlobe. Sproščena ultravijolična svetloba interagira s fosforjem, ki pokriva notranjo stran celice (slika 6). Fosfor je material, ki seva vidno svetlobo, če nanj vpadе ultravijolična svetloba. Ko foton ultravijolične svetlobe zadane atom fosforja v celici, vzbudi fosforjev elektron v višje stanje, pri tem pa se atom segreje. Ko elektron pade nazaj v osnovno stanje, izseva vidno svetlobo.

Elektroni fosforja v plazemskih zaslonih oddajajo barvno svetlobo pri prehodu v nižja stanja. Vsak piksel je narejen iz treh ločenih celic. Vsaka izmed celic, ki sestavljajo piksel, vsebuje fosfor, ki seva svetlobo druge barve. Vsak piksel je tako sestavljen iz rdeče, zelene in modre celice. Končno barvo piksla določa mešanica teh treh barv.

S spreminjanjem pulzov toka, ki teče skozi celice, lahko kontrolni sistem poveča oziroma zmanjša intenziteto barve vsake celice. Tako dobimo različne odtenke modre, rdeče in zelene barve, njihovo mešanje pa nam da barve, ki pokrivajo velik del celotnega spektra.



Slika 6: Plazemski zaslon. Na sliki je prikazana razelektritev elektronov, ko le ti dosežejo zgornjo stekleno ploščo [18].

Prednost plazemskih zaslonov je v tem, da lahko naredimo zelo velike zaslone, ki pa so hkrati tudi zelo tanki. Ker osvetljen vsak piksel posebej, je slika zelo svetla in izgleda enako dobro s katerega koli kota. Glavna slabost plazemskih zaslonov je kvaliteta njihove slike, ki zaenkrat še ne dosega kvalitete katodnih zaslonov. Problem je predvsem v barvnih odtenkih, vendar večina ljudi tega ne opazi.

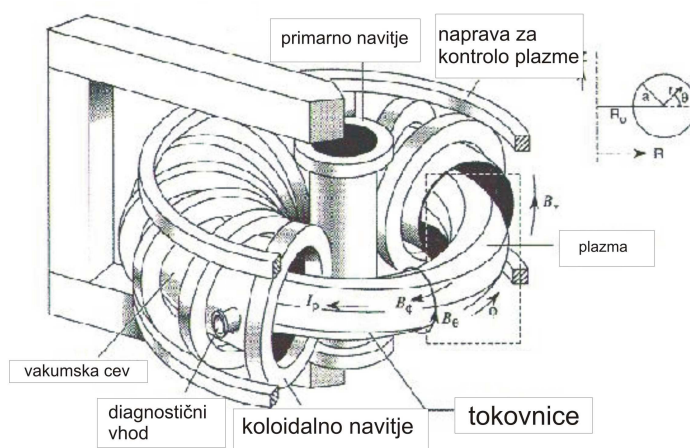
5.4 Fuzija

Fuzija je proces zlivanja jeder lahkih atomov (devterij, tritij), pri čemer se sprošča energija. Na Zemlji je za učinkovito zlivanje jeder potrebna temperatura nad 100 milijonov K [19]. Pri tako visoki temperaturi plini preidejo v plazmo. Da preprečimo toplotne izgube, se plazma ne sme dotikati sten posode, kar dosežemo z močnimi magnetnimi polji, ki ustvarijo magnetno kletko toroidalne oblike. Magnetna kletka zadržuje nabite delce v plazmi. Nevtralni delci (nevtroni) lahko zapustijo plazmo in se upočasnijo v oblogi, ki obdaja plazmo in vsebuje litij. Iz njega ob trku z nevtroni nastaja tritij, ki se v plazmo vrne kot gorivo. Energija, ki jo v obliki toplote oddajajo nevtroni, se uporablja za proizvodnjo elektrike [19].

Magnetna fuzija izkorišča močno magnetno polje, ki zadržuje plazmo v posodi in jo ločuje od zraka. Električno nabiti delci, ki tvorijo plazmo, ne morejo prečkati silnic, lahko pa se gibljejo vzdolž njih. Če so magnetne silnice ukrivljene tako, da tvorijo sklenjeno zanko, so delci plazme zaprti v ta prostor. Delci v realnih toroidalnih magnetnih sistemih izgubljajo energijo na račun sevanja in trka delcev, ki povzročijo, da lahko nekateri delci sčasoma uidejo iz oklepa magnetnih silnic. Magnetna polja ustvarijo močni električni tokovi in tuljavah zunaj reaktorske komore in pogosto tudi tokovi, ki nastajajo v plazmi, in prispevajo k magnetni kletki.

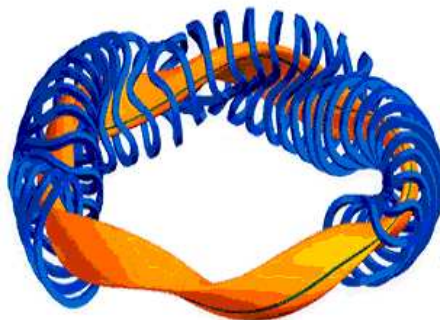
Najbolj razširjene izvedbe fuzijskega reaktorja so reaktorji tipa tokamak in stelarator. V izvedbi reaktorja imenovanega tokamak deluje plazma kot sekundarno transformatorsko navitje. Primarno navitje je zunanja

tuljava, sprememba toka v njej pa povzroči induciranje toka v plazmi (slika 7). Induciran tok v plazmi ustvari magnetno polje, ki pripomore k zadrževanju plazme v posodi in hkrati plazmo delno segreva, zaradi česar se poveča električna upornost plazme. Na ta način ne moremo doseči stacionarnega stanja, ker transformator ne more neprekinjeno inducirati toka v plazmi.



Slika 7: Shema tokamaka. Sestavljen je iz poloidnih in toroidnih tuljav, vakuumske cevi in transformatorja [20]. Poloidne in koloidne tuljave ustvarijo magnetno polje, ki zadržuje plazmo v posodi in jo ločuje od zraka. Plazma je ujeta v vakumski cevi.

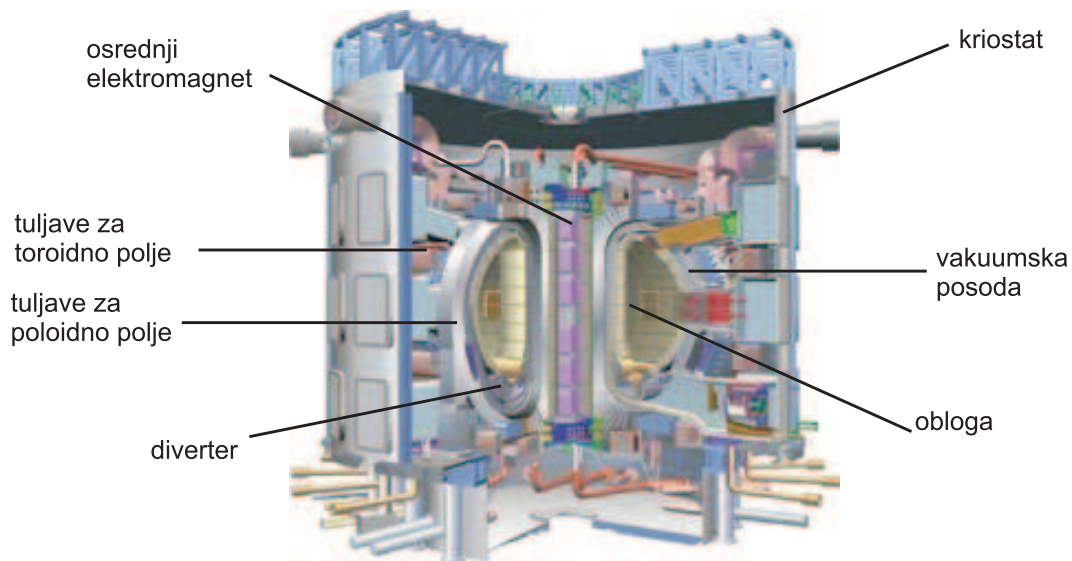
V reaktorju tipa stelarator (slika 8) je princip delovanja magnetne zanke enak. Razlika je le v obliki zunanje tuljave, ki tokrat ni odvisna od transformatorskega učinka. Tok v plazmi se inducira zaradi komplicirane oblike zunanje tuljave, kar omogoča neprekinjeno delovanje fuzijskega reaktorja takega tipa.



Slika 8: Shema stelaratorja. Komplicirana oblika zunanje tuljave (na sliki je označena z modro barvo) omogoča neprekinjeno delovanje reaktorja [19]. Oranžna barva na sliki ponazarja plazmo.

Poznamo še dve sorodni vrsti fuzijskih reaktorjev, in sicer kompaktni (ali sferični) tokamak in napravo z obrnjenim poljem. Na sliki 9 je prikazan tokamak, označeni pa so vsi njegovi sestavni deli, in sicer osrednji elektromagnet, tuljave za toroidno in poloidno polje, diverter, kriostat, vakuumska posoda in obloga. Na sliki 10 je prikazan presek tokamaka. Na levem delu slike naprava miruje, na desnem delu slike pa se lepo vidi plazma med delovanje tokamaka.

Tok skozi plazmo v tokamaku plazme ne segreje dovolj, da bi ob dovajanju novega goriva (devterij in tritij) temperatura ohranjala na 100 milijonih K, zato moramo plazmo dodatno segreti.

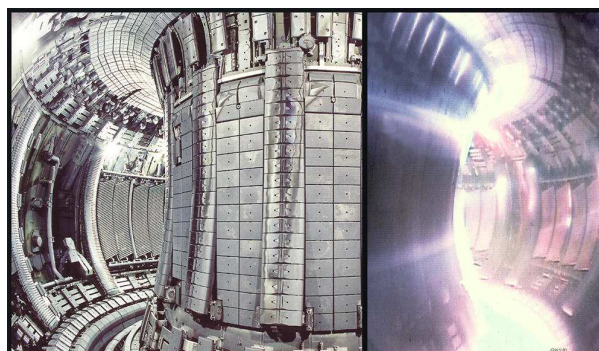


Slika 9: Osnovni sestavni deli tokamaka. Tokamak sestavlja osrednji elektromagnet, ki je del primarnega kroga transformatorja; tuljave za toroidno in poloidno polje, ki tvorijo močno magnetno polje (5 T); diverter, ki odstrani nečistoče in helij iz vakuumske posode in je edina površina v reaktorju, kjer se plazma lahko dotakne stene posode; kriostat, ki je ohlajen na temperaturo -200°C in pomaga vzdrževati temperaturo superprevodnih magnetov pri -260°C ; vakuumska posoda, ki preprečuje dostop zraka do plazme; in obloga iz litija [19].

Ohmsko ali uporovno segrevanje, pri katerem plazmo segrevamo s tokom, ki ga le-ta prevaja, nam omogoča segrevanje plazme do temperature 20 milijonov K. Z naraščanjem temperature se upornost zmanjša, zato uporovno segrevanje pri višjih temperaturah ni več učinkovito.

Visokofrekvenčno segrevanje izkorišča visokoenergijske elektromagnetne valove različnih frekvenc. Ti preko resonančne absorpcije plazmi predajo svojo energijo. Razviti so trije sistemi [21]:

- nižje hibridno segrevanje s frekvencami od 1 do 8 GHz,
- ionsko ciklotronsko resonančno segrevanje s frekvencami od 20 MHz do 55 MHz, in
- elektronsko ciklotronsko resonančno segrevanje s frekvencami od 100 do 200 GHz.



Slika 10: Notranjost vakuumske posode v tokomaku. Na levem delu slike je prikazan prazen prostor, na desnem delu slike pa plazma med delovanjem reaktorja [19].

Največji trenutno delujoči tokomak v Evropi je JET, postavljen v mestu Culham v Veliki Britaniji. Leta 1997 je dosegel rekordno moč 16 MW. Njegov izkoristek je 0.65 % [19]. Njegov naslednik bo ITER, katerega izkoristek naj bi po predvidevanjih dosegel 10 % [19]. Predvidevajo, da bo lahko 6 min proizvajal moč 600 MW.

5.5 CNC stroji

CNC stroj za rezanje s plazmo je stroj, ki se uporablja za rezanje, vrtnanje in oblikovanje kovin in je sposoben narediti oster rob. Za rezanje stroj uporablja močno segret ioniziran plin. Plazemski rezalniki lahko vroč plin s temperaturo 30000 K sfokusirajo v tanek curek, ki zlahka prereže tudi najdebelejše plošče kovine. Širina cuka znaša od 6 do 150 mm [22]. Kovino lahko razrežemo na ± 0.254 mm natančno [23]. S plazemskimi rezalniki lahko razrežemo kovino debelo do 30 cm debele kose kovine.

Plazemski rezalniki se prvič pojavili med II. svetovno vojno, uporabljali pa so jih za izdelavo letal in oklepnih vozil. Danes so CNC plazemski rezalniki (slika 11 a) standardni del industrijske opreme zlasti na področjih aeronavtike in konstrukcije, uporabljajo pa jih tako avtomobilski proizvajalci kot tudi ključavničarji. Zaradi natančnosti in lahke vodljivosti jih pogosto uporabljajo tudi različni umetniki za izdelavo skulptur in drugih kovinskih predmetov.

Večina plazemskih rezalnikov je narejena na podoben način. Plin (argon, kisik oziroma dušik) spustimo skozi ozko šobo, v kateri je elektroda, ki plin s pomočjo električnega toka ionizira. Pri tem se sprosti velika količina energije, ki lahko stopi najzahtevnejše industrijske komponente, hkrati pa tudi vse, kar curku energije pride na pot. Žarki plazemskih rezalnikov so zato dobro zaščiteni in omejeni v tanek snop (slika 11 b) s pomočjo zaščitnih plinov, ki jih izločajo stranski kanali rezalnika [24].



a



b

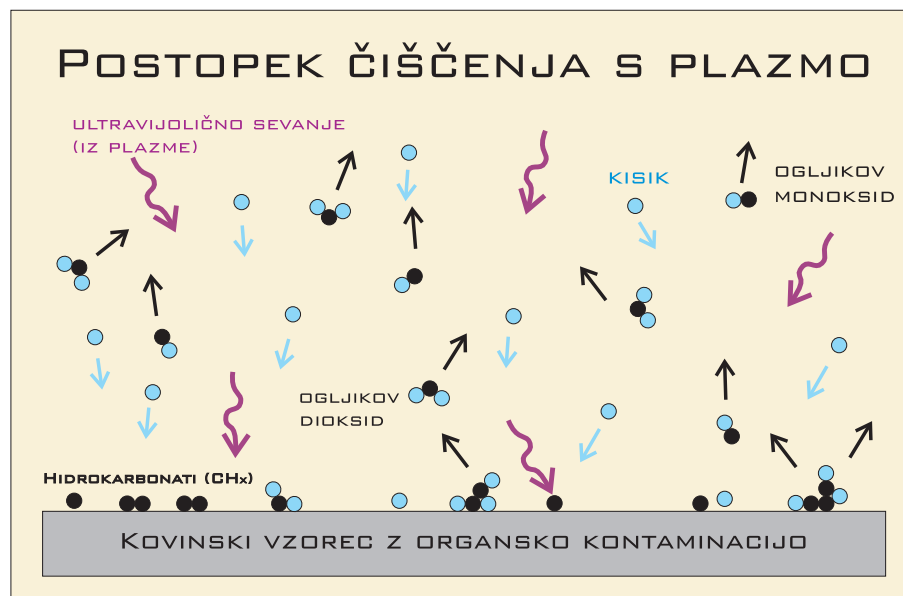
Slika 11: Na sliki a) je prikazan CNC stroj [25] za rezanje s plazmo. Slika b) prikazuje rezanje kovine s plazmo [26].

5.6 Čiščenje s plazmo

Čiščenje s plazmo je eden izmed plazemskih procesov, ki jih uporabljamo za obdelavo površin. Čiščenje s plazmo je primerno za odstranjevanje tankih filmov, ki se jih z običajnimi metodami čiščenja ni dalo odstraniti. Posebej primerno je za odstranjevanje organskih (oksidnih, hidro karbonatnih filmov) ostankov s površja kovin, npr. odstranjevanje olja s kovinske površine [27].

Pri čiščenju je pomembno izbrati pravilno vrsto plazemskega plina, ker vsak izmed plazemskih plinov v stiku z površino reagira drugače. Kisik je primeren za odstranjevanje oksidov, medtem ko je argon primeren za peskane površine.

Ionizirani atomi v plazmi se vežejo z ioni na površini kovine. Nastanejo nove nevtralne molekule (voda, ogljikov dioksid). Ker se ioni, ki so bili poprej vezani na površino, z nje odcepajo, je površina spet čista. Postopek je prikazan na sliki 12. Slika 13 pa prikazuje kovanec pred in po čiščenju s plazmo.



Slika 12: Postopek čiščenja s plazmo. Ionizirani atomi kisika se vežejo na ogljikove ione na površju. Le-ti se odcepajo od kontaminirane površine, pri čemer nastajata ogljikov dioksid, ogljikov monoksid in voda [27].



a



b

Slika 13: Primerjava umazanega kovanca s kovancem očiščenim s plazmo. Na sliki a) je prikazan kovanec pred čiščenjem s plazmo, na sliki b) pa po čiščenju s plazmo [22].

6 ZAKLJUČEK

Plazma je četrto agregatno stanje in je prevladujoča snov vidnega vesolja, saj je sestavljena kar 99 % vidnega vesolja. Na Zemlji se plazma v naravi pojavlja v različnih oblikah, npr. kot polarni sij in strele, na površju pa npr. v obliki ognja, vendar pa zaradi nizkih temperatur in stalno visokega pritiska to stanje ni tako pogosto kot v vesolju. Poleg naravne poznamo tudi umetno plazmo, ki jo naredimo v laboratorijih z električnim tokom, ki ionizira plin. Področje plazemske fizike je zelo široko, saj pokriva področje od mikroskopskih pa vse do makroskopskih skal. Zaradi te raznolikosti se vedno znova odpirajo nova področja in možnosti za uporabo.

Literatura

- [1] <http://public.lanl.gov/alp/plasma/ubiquitous.html>, citiran 6. 5. 2007.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_(physics)), citiran 3. 5. 2007.
- [3] <http://www.chem.ox.ac.uk/icl/heyess/LanthAct/Biogs/Crookes.html>, citiran 5. 5. 2007.
- [4] <http://www.plasmacoalition.org/what.htm>, citiran 5. 5. 2007.
- [5] M. Čerček, T. Gyergyek, *Diagnostika razelektrivene plazme z Langmuirovo sondo in emisijsko sondo* (Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2000).
- [7] T. J. M. Boyd in J. J. Sanderson, *The Physics of Plasmas* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).
- [6] V. E. Golant, A. P. Zhilinsky in I. E. Sakharov, *Fundamentals of plasma physics* (John Wiley & Sons, New York, 1980).
- [8] <http://www.plasmas.org/powers.htm>, citiran 5. 5. 2007.
- [9] D. A. Gurnett, *Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- [10] <http://www.forecastuniverse.com/plasmalights.shtml>, citiran 7. 5. 2007.
- [11] <http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2003/0107lightning.html>, citiran 7. 5. 2007.
- [12] <http://www.pbs.org/wnet/hawking/strange/assets/images/ss.nebulae.jpg>, citiran 7. 5. 2007.
- [13] <http://sdphca.ucsd.edu/>, citiran 12. 5. 2007.
- [14] <http://science.nasa.gov/ssl/pad/sppb/dusty/>, citiran 9. 5. 2007.
- [15] P. K. Shukla, N. Shukla, L. Stenflo, *Physics Letters* 365, 131 (2007).
- [16] <http://www.waterdropgraphics.com/plamaball.gif>, citiran 8. 5. 2007.
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp, citiran 8. 5. 2007.
- [18] <http://electronics.howstuffworks.com/plasma-display1.htm>, citiran 8. 5. 2007.
- [19] Evropska Komisija, *Raziskave fuzije: Energija za prihodnost Evrope* (Urad za uradne publikacije Evropske skupnosti, Belgija, 2005).
- [20] <http://www.cfn.ist.utl.pt/pt/consultorio/listB.html>, citiran 8. 5. 2007.
- [21] http://www.pppl.gov/fusion_basics/pages/plasma_heating.html, citiran 10. 5. 2007.
- [22] <http://www.steeltailor.com>, citiran 13. 5. 2007.
- [23] <http://www.plasma-cutter.com/index.html>, citiran 13. 5. 2007.
- [24] <http://www.mtc-software.com/image/applications/hi-plasma.jpg>, citiran 7. 5. 2007.
- [25] www.fairfielddauctions.co.uk, citiran 7. 5. 2007.
- [26] <http://www.machines-direct.com/Plasma-Cutters.htm>, citiran 7. 5. 2007.
- [27] S. Deiries, A. Silber, O. Iwert, E. Hummel and J. L. Lizon, *Plasma Cleaning* (ESO, Germany, 2006).
- [28] <http://www.ijs.si/ijs/dept/f4/indexeng.html>, citiran 9. 5. 2007.