

Tehnologije za proizvodnju i regeneraciju magnetronskih oscilatora i pojačivača

Z. Lj. Petrović i S. S. Manola

MTT INFIZ i Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, PP 57, 11001 Beograd, Jugoslavija

Sažetak

U ovom radu je dat pregled tehnologija potrebnih za proizvodnju mikrotalasnih cevi i njihovu regeneraciju. U MTT INFIZ-u je razvijena maloserijska proizvodnja nekoliko tipova impulsnih magnetrona manjih i srednjih snaga. Kada se proizvodnja nije pokazala ekonomski isplativa, najbolje rešenje je bila regeneracija postojećih neispravnih primeraka. Regeneracija je bila veoma uspešna i isplativa tako što je kod većine cevi vreme eksploatacije produženo za 70% uz dodatne troškove manje od 10% cene nove cevi. Kratko su opisana i iskustva u primeni mikrotalasa, posebno za proizvodnje i primenu plazme.

1. Uvod

Tokom poslednje decenije mikrotalasnim cevima se usled konkurencije od visokofrekventnih poluprovodnih pojačivača znatno suzio domen primene, a samim tim i ulaganja u dalji razvoj. Mikrotalasne cevi, međutim, i dalje dominiraju kada su potrebne velike snage, velike učestanosti, specijalne namene i jeftina masovna proizvodnja. Zbog toga se i dalje nastavlja proizvodnja i razvoj cevi, pre svega sa ciljem da se postignu što veće snage i frekvencije, kao i da se otvore nove oblasti primene. U našoj zemlji do sada nije postojalo ni organizovano istraživanje ni razvoj, a ni proizvodnja mikrotalasnih cevi.

Prema potrebama koje su se pojavile u primeni mikrotalasnih cevi, u MTT INFIZ-u je razvijena proizvodnja impulsnih magnetrona malih i srednjih snaga u opsegu od stotinak W do nekoliko kW. Kako proizvodnja drugih tipova magnetrona i drugih tipova mikrotalasnih cevi, koji su na našem tržištu prisutni u malom broju, nije bila ekonomski isplativa, došlo je i do razvoja tehnologija za reparaciju postojećih cevi. Mi ćemo se u ovom tekstu pre svega orijentisati na opis tehnologija koje su neophodne i procesa proizvodnje, reparacije i primene magnetrona, mada su i ostali tipovi cevi bili i još uvek jesu predmet istraživanja, odnosno razvoja.

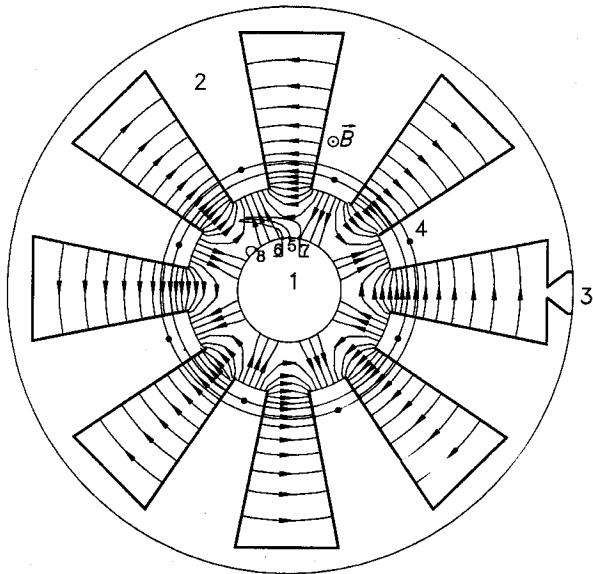
1.1 Osnovni delovi i princip rada magnetrona

Magnetron je mikrotalasni oscilator koji se bazira na specifičnim osobinama kretanja elektrona u ukrštenim električnim i magnetskim poljima [1-6]. Na slici 1 je prikazana geometrija i raspodela polja tipičnog magnetronskog sistema. Ukratko rečeno, magnetron se sastoji od dve cilindrične elektrode (anoda je spoljni deo) i ceo sistem je u jakom aksijalnom magnetskom polju. Između katode i anode je veoma veliki napon i u ukrštenim jednosmernim poljima elektroni opisuju cikloidalne putanje i vraćaju se na katodu. Jedna grupa elektrona predaje energiju radiofrekventnom polju na anodi i kreće se u fazi sa rotirajućim poljem, a druga grupa dobija energiju od polja i vraća se ka katodi dok ne dođe u fazu sa poljem [3]. Tako se formira modulacija oblaka elektrona koja rotira u fazi sa poljem. Pored dve elektrode, sistem ima takozvani set kratkospojnih prstenova koji služe da pojačaju kapacitivnu spregu i obezbede stabilan rad u π režimu, sistem za podešavanje učestanosti (kod frekventno agilnih cevi), kao i sistem za spregu anodnog rezonatora sa talasovodom. Kod magnetronskog pojačivača razdvaja se sprega, odnosno prekida se kružna putanja talasa sa zakočnom elektrodom koja uklanja elektronski snop i time izbacuje njegovu već postojeću modulaciju. Ova elektroda se nalazi između izlaznog i ulaznog terminala.

2. Tehnologije za proizvodnju magnetrona

2.1 Izrada anodnog bloka

Anodni blokovi se obično prave od bakra. Kako bi se obezbedio kontinualan rad u visokom vakuumu, koristi se vakuumski liveni bakar maksimalne čistoće. Na višim učestanostima preciznost obrade diktiraju male talasne dužine, odnosno male strukture u rezonatoru. Na nižim učestanostima zahtevi za obradu su gotovo isto tako strogi zbog potrebe da se precizno konstruišu položaji i dimenzije kratkospojnih prstenova i sistema za kontrolu učestanosti.



Slika 1. Poprečni presek magnetrona i raspodela polja: 1—katoda, 2—anoda, 3—izlazna sprega i 4—prstenovi za stabilizaciju π -moda. Karakteristične putanje elektrona označene su sa 5, 6, 7 i 8 [1].

Ispostavlja se da primena različitog, premda nominalno istog materijala može da dovede do promena radne učestanosti, čak i sa identičnim dimenzijama. U tim prilikama najbolje je koristiti diferencijalne formule za zavisnost učestanosti od raznih parametara [2,4], kako bi se postigla željena učestanost malom promenom neke od dimenzija na koju je najlakše uticati bez bitnih promena geometrije i ostalih radnih karakteristika.

Preciznost obrade koja se traži može se jedino postići kompjuterski kontrolisanim glodalicama, kao i erozimantima koji koriste destilovanu vodu kao radni medijum. Tipične dimenzije struktura na anodnom bloku za magnetron koji radi na 10 GHz su reda veličine od 1 mm, uz odgovarajuće tolerancije. Kako su u sistemu veoma velika polja, finoća obrade je jedan od kritičnih parametara, jer prisustvo neravnina može da dovede do proboja u vakuumu uz isparavanje materijala, što dalje dovodi do lokalnih oštećenja bilo anode bilo katode, a eventualno i do prestanka funkcionisanja cevi.

Izrada krakospojnih prstenova i njihovo spajanje sa anodnim blokom zahteva sličnu preciznost izrade i montiranja, pre svega zbog uticaja na stabilan rad u takozvanom π režimu. Tipičan problem koji se dešava je da kombinacija sistema kratkospojnih prstenova i anodnog rezonatora sa sistemom za promenu učestanosti dovede do stabilnog rada u većem delu frekventnog opsega, ali i do izrazitih nestabilnosti u jednom manjem delu. Ovo je posebno izraženo kod sistema kod kojih se frekventna agilnost postiže umetanjem metalnog profila u zonu kratkospojnih prstenova.

2.2 Katoda

Katoda je verovatno najteži deo magnetrona za razvoj. Postoji nekoliko tipova katode. Kod nekih magnetrona bombardovanje katode elektronima je dovoljno da zagreje površinu do temperature potrebne da se postigne emisija, pa se dodatno grejanje gasi po uključanju sistema. Kod većine sistema, međutim, grejanje mora stalno da se dodaje, bilo kroz indirektni grejač, bilo kroz direktno zagrevanje emisionog sloja. U svakom slučaju, površina katode trpi konstantno bombardovanje česticama velike energije, pa je to najčešće mesto sa najvišom temperaturom. Pored toga, materijali koji se koriste obično nisu pogodni za primene u visokom vakuumu. Smesa od koje se pravi emisioni sloj se nanosi na niklenu mrežicu i aktivira se hemijska reakcija, a odvode se gasovi koji su pre svega produkti CO_2 . Formiranje katode mora da bude kompletno pre zatvaranja sistema kako se ne bi kvario vakuum. S druge strane, katoda ne može da se testira na atmosferskom pritisku, jer biva znatno oštećena. Problem je i u tome da se u proceduru formiranja mora ukalkulisati i proces čišćenja anode kako ne bi došlo do pregrevanja ili zagađenja jednog ili drugog dela. U MTT INFIZ-u sa uspehom je razvijena tehnologija proizvodnje oksidnih katoda. Posebna veština i iskustvo su potrebni da bi se ostvarili homogeni slojevi velike uniformnosti površine i gustine kako bi bez problema radili u vakuumu. Međutim, kod sistema sa metalnim katodama zahteva se lagano ispuštanje kiseonika. Ono mora da bude dovoljno da se na površini stalno održava oksidni sloj, a opet pritisak mora da bude jako nizak da ne bi došlo do proboja u gasu i varnice koja oštećuje anodni blok i uniformnost površine katode.

2.3 Sklapanje i formiranje magnetrona

Velika cena mikrotalasnih cevi specijalne namene uslovlila je i težnju proizvođača da oteža otvaranje i zatvaranje cevi, kao i bilo kakvu dijagnostiku unutrašnjeg stanja. Kod svakog otvaranja troši se deo materijala spojeva na cevi, te je broj otvaranja i zatvaranja ograničen, ako se ne razvije procedura dopune. Poznajući dobro dimenzije pojedinih delova, mogli smo da potvrdimo korisnicima da su neke cevi koje su za veliku cenu kupljene kao nove bile u stvari reparirane, korišćene cevi. Dakle, iako se to gotovo nigde ne spominje, reparacija starih cevi od strane originalnih proizvođača je česta pojava, ali je taj postupak maksimalno otežan za druge.

Montiranje delova zahteva veliku preciznost. Srećom, veoma precizno određen i centriran položaj katode nije neophodan, što olakšava proceduru, s obzirom na to da je katoda ponekad veoma mala [2] (prečnik oko 1 mm, a razmak do anode takode oko 1 mm).

Spajanje svih delova mora da se obavi najkvalitetnijim postupcima kako ne bi došlo do ucuringanja gasa, a ni do promena dimenzija ili položaja sklopova. Na kraju se sklopljena i zatvorena cev preko jednog uvodnika vezuje na vakuumski štand i vakuumira. Bakarna anoda se potom čisti punjenjem sistema specijalnom smešom gasova i odgreva na visokoj temperaturi. Vodoniak iz smeše uklanja kiseonik iz oksida sa površine bakra, a procedura traje od 3 pa do 12 sati. Na kraju se sistem ponovo vakuumira uz odgrevanje na visokoj temperaturi od oko 400°C, kako bi se uklonili svi mogući gasovi vezani za površine. Neophodno je postići pritisak manji od 10⁻⁸ Torr. Kako je moguće da i pored niskog pritiska stvorenog ispuvanjem ostanu mali otvori ili se pojave pri hlađenju, neophodno se vrši i testiranje ucuringanja sa ohlađenim sistemom. Kada se zadovolje potrebni uslovi, preostaje veoma osetljiv proces zatvaranja tokom kojeg se mogu uneti izvori ucuringanja u sistem.

Poslednji i najteži korak je aktiviranje cevi. Kod velikih proizvođača razvoj prateće elektronike je pratio razvoj cevi, pa joj je ona prilagođena. U našem slučaju, uvek je postojao neki sistem u koji je naša cev morala da se uklopi, što je mnogo teže. Posebno je bitan režim napajanja jednosmernog i oblik visokonaponskog impulsa. Strujno-naponska karakteristika magnetrona je složena i, po pravilu, cevi bez takozvanog „treciranja” ne mogu da rade optimalno. Veliki proizvođači imaju posebno izrađene sisteme za treciranje cevi u fabrici i u tom postupku ih dovedu do optimalnog režima, ali mi nismo imali mogućnosti da razvijemo takve uređaje, već su za treciranje korišćeni korisnički sistemi. Po pravilu se polako podiže jednosmerni napon i prati porast struje. Istovremeno se prati kompletna dijagnostika koja je na raspolaganju, a u sistemima koji to imaju, posebno se prati struja getera koja govori o stanju vakuuma u sistemu i ne dozvoljava se da pritisak gasa pređe neku granicu posle koje cev može da se ošteti. Kada to postane moguće, kod pojačivačkih cevi treba da se pusti signal, jer se režimi rada sa i bez signala veoma razlikuju. Radom u uslovima što bližim optimalnim i pokušajima da se kontinuirano podiže napon sve bliže i bliže radnom, nelinearno se menjaju osobine površina u cevi usled bombardovanja i one počinju da rade sve stabilnije. Ukoliko povećanje napona dovodi do proboja ili nestabilnosti, treba se vratiti u režim gde je rad stabilan, nastaviti neko vreme, pa opet probati da se povećanjem radnog napona ide dalje. Treciranje se mora nastaviti i po nekoliko dana da bi se postigao stabilan rad. Međutim, ponekad ga nije moguće postići, obično zbog ucuringanja gasa pri zatvaranju cevi. Nema jednostavnog recepta kako da se proceni kada je uzrok nestabilnog rada varničenje usled povećanog pritiska, ali ako se varničenje javlja redovno pri povećanju napona, onda je, verovatno, to

uzrok. Tada treba prekinuti „treciranje” što pre i ponovo vakuumirati ili čak ponovo preraditi cev.

Finalna optimizacija podrazumeva dovođenje u okvire radnog napona i struje i posebno snage, odnosno pojačanja. Takođe je važno pratiti spektralne karakteristike signala, odnosno intenzitet bočnih učestanosti i vremensku zavisnost naponsko strujnih impulsa. Postupak treciranja se mora ponoviti i posle dužeg skladištenja, a neke cevi usled dužeg skladištenja mogu da postanu i neupotrebljive, ali sa dobrim izgledima za reparaciju.

U procesima regeneracije cevi, tipični zahvati uključuju vakuumiranje i degazaciju cevi, zamenu katode ili nanošenje novog sloja na katodu, popravku oštećenih delova anodnog bloka i sistema za hlađenje anode, popravku oštećenja na staklenim delovima i spojevima staklo-metal, a ponekad je od nekoliko oštećenih cevi pravljena jedna, ispravna. Redovna intervencija, bilo kod novih ili repariranih magnetrona je magnetizacija magnetna na potrebnu vrednost jačine polja.

3. Primeri izrade i regeneracije

Izrada magnetrona u MTT INFIZ-u obuhvata male serije impulsnih, frekventno agilnih magnetrona za rad u opsegu do 10 GHz (L, S i X band). Sistemi koji su proizvođeni imaju veoma različite karakteristike i dimenzije. Za ove uređaje svi delovi i sve tehnologije potrebni za proizvodnju su razvijeni i uspešno korišćeni u MTT INFIZ-u.

Reparacija magnetrona i pojačivača je obavljena na nizu cevi veoma različitih osobina i namena. Posebno je uspešno regenerisan magnetronski pojačivač visoke snage u L opsegu za osmatračke radare velikog dometa. Poneki od primeraka koji su regenerisani su postizali i veće snage od nominalne i od ranije postignute, a radili su u proseku 60%-70%, a maksimalno do 120% propisanog radnog veka. Neke cevi su reparirane uspešno više puta.

Pored vojnih i civilnih radarskih sistema, magnetroni koji su trecirani korišćeni su za mnoge druge namene, poput vulkanizacije gume i posebno za radijacionu terapiju u onkologiji. Naime, magnetron (u S bandu) je osnovni izvor impulsa mikrotalasa koji povlači snop elektrona u akceleratoru i ubrzava ih. Udarom elektrona u metu proizvodi se snop rendgenskih zraka. Ovo je i primer neophodnosti da se uz reaktiviranje cevi obave i ostale popravke na delovima celog sistema - od popravke talasovoda i sistema za merenje snage impulsa do popravke sistema za hlađenje.

4. Primene i modelovanje mikrotalasa za proizvodnju plazmi

Rad na razvoju i regeneraciji samih cevi izazvao je i interesovanje za razvoj i primenu mikrotalasa za dobijanje niskotemperaturne plazme. Standardni magnetroni za mikrotalasnne pećnice su se pokazali kao efikasni izvori plazme. Ova plazma je primenjena za razvoj sterilizatora za medicinsku opremu gde je petominutni tretman bio dovoljan da se postigne propisan stepen uništenja svih ispitivanih bakterija i virusa, a da se istovremeno instrumenti ne izlažu visokoj temperaturi i promenama temperature [7]. Mikrotalaska plazma je primenjena za tretiranje polimera, posle čega je omogućeno farbanje i lepljenje relativno jeftinih plastičnih materijala [8]. Razvijena su teorijska istraživanja nastanka plazmi u visokofrekventnim poljima i primena, posebno u mikroelektronici, za proizvodnju integrisanih kola [9-11]. Tako su identifikovani novi kinetički fenomeni u transportu elektrona u vremenski promenljivim poljima, kao što je anomalna vremenska zavisnost komponenti difuzionog tenzora i asimetrični drift u ukrštenim električnim i magnetskim poljima, a izvršeni su i proračuni vezani za primenu fokusiranih mikrotalasa velike gustine snage radi uklanjanja freona iz atmosfere [12]. Ova istraživanja su motivisana činjenicom da je jedan od glavnih pokretača daljeg razvoja mikrotalasnih izvora velike snage primena u proizvodnji atomsferske i fuzione plazme, posebno za uklanjanje polutanata, za radare sa posmatranjem preko granice horizonta i za transmitovanje energije do i sa satelita. Metode koje su razvijene za analizu visokofrekventnih plazmi pokazale su se i kao dobra osnova za ispitivanje multipaktorskih pražnjenja koje je u toku.

Direktne primene mikrotalasa su se pre svega odnosile na ispitivanje mogućnosti primene za sušenje i za sterilizaciju hrane (zagrevanjem mikrotalasa se izbegava pregrevanje delova u direktnom kontaktu sa izvorom grejanja, što može dovesti do proizvodnje opasnih materija), za sušenje drveta i druge, ali ova istraživanja su ostala u domenu prenošenja postojećih iskustava u domen naše privrede i odziv interesenata je bio veoma ograničen.

5. Zaključak

U zaključku možemo navesti da je u MTT INFIZ-u razvojem niza tehnologija koje uključuju vakuumske tehnologije, hemijske tehnologije, preciznu mehaniku i obradu, pripremu posebnih materijala, digitalnu i energetsku elektroniku, fiziku i tehnologije plazme, uspešno organizovana reparacija i proizvodnja mikrotalasnih cevi, pre svega magnetrona i magnetronskih pojačivača. Proizvedeno je nekoliko modela

magnetrona za razne opsege malih i srednjih snaga. Reparirani su praktično svi magnetroni i većina drugih mikrotalasnih cevi koji se nalaze u upotrebi u zemlji. Iskustva stečena u reparaciji i proizvodnji su brojna i korisna za svakoga ko je u prilici da nabavlja veoma skupe cevi za mnogo skuplje sisteme koji pogrešnim izborom cevi često bivaju nedovoljno korišćeni. Kao primer možemo da navedemo da se za jedan tip radara mogu nabaviti cevi od dva različita proizvođača (po veoma visokoj ceni od oko 50.000\$). I dok jedan uključuje terminal za merenje struje geterske pumpe, drugi to ne čini. Provera struje geterske pumpe može dovesti do otkrića ucuringa gasa, posebno posle dužeg skladištenja i uz relativno jednostavnu regeneraciju cev se eventualno može koristiti. Drugi faktor je činjenica da je vreme postojanja podrške i snabdevanja delovima ograničeno ili uslovljeno političkim i ekonomskim uslovima. Primenom regeneracije cevi vek korišćenja ovih veoma skupih uređaja se može znatno produžiti.

Zahvalnica

Pored autora, na programima opisanim u ovom tekstu direktno su učestvovali i Zoran Stokić, Zoran Vasiljević i Ratko Jankov (Hemijski fakultet, Univerzitet u Beogradu), kao i gotovo svi stručni i tehnički saradnici MTT INFIZ-a. Tokom trajanja projekta u periodu od više od deset godina, korisnim sugestijama i tehničkom podrškom mnogo su nam pomogle brojne kolege iz Instituta za fiziku, sa ETF Univerziteta u Beogradu, iz IMTEL-a i posebno VJ, na čemu im se svima zahvaljujemo.

Literatura

- [1] A. Đorđević, A. Marinčić and Z. Lj. Petrović, *Mikrotalasnne cevi*, Elektron - Sto godina od otkrića; Vol. 5 Elektron u čvrstim telima i primena elektrona (Ed. M.V. Kurepa) Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd (1997) 376-403.
- [2] G. B. Collin, *Microwave Magnetrons*, McGrawHill, New York (1948).
- [3] R. E. Collin: *Foundations for Microwave Engineering*. McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, 1966.
- [4] Z. Lj. Petrović, B. M. Jelenković i S. S. Manola: *Analiza postojećih rešenja magnetrona i drugih izvora mikrotalasa*, Institut za fiziku, Zemun, (1987).
- [5] D. Milanović: *Hiperfrekvencije - Mikrotalasi*, Građevinska knjiga, Beograd, 1973.
- [6] A. S. Gilmour: *Microwave Tubes*, Artech House, Norwood, 1986.

- [7] S. Manola, Z. Lj. Petrović and R. M. Jankov, 16th SPIG XVI Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Ed. M. Milosavljević, Belgrade (1993) 285.
- [8] I. V. Jovanović, D. R. Popović, S. S. Manola, B. Tomčik i Z. Lj. Petrović, Proc. 26th European Microwave Conference, Prague (1996) 73.
- [9] K. Maeda, T. Makabe, N. Nakano, S. Bzenić and Z. Lj. Petrović, Phys. Rev. E 55 (1997) 5901.
- [10] Z. Lj. Petrović, S. Bzenić, J. Jovanović and S. Đurović, J. Phys. D 28 (1995) 2287.
- [11] Z. Lj. Petrović, S. Bzenić and T. Makabe (Invited lecture), Proc. International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Ion and Electron Swarms, Engelberg Ed. M.Allen (1997) L20.
- [12] S. A. Bzenić, S. S. Manola and Z. Lj. Petrović, 25th European Microwave Conference (Bologna) (Nexus, Swanley, 1995) 856.