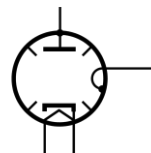


Magnetron

Magnetron je vakuová elektronka pro generování vysokofrekvenčních oscilací a často se používá k výrobě vysokého pulzního výkonu potřebného v radarech. Funkce je založena na modulaci rychlosti elektronů v běžícím prostoru. Magnetron je proto klasifikován jako trubice s dobou letu. Magnetron je samovzbuzující oscilátor, který pracuje jinak než lineární elektronky, jako je elektronka s postupnou vlnou nebo klystron. Relativně jednoduchá konstrukce má tu nevýhodu, že magnetron může obvykle pracovat pouze na pevně stanovené frekvenci. Ta se může pohybovat od 600 MHz do přibližně 95 GHz. Elektrické pole a silné magnetické pole jsou v magnetronu uspořádány kolmo na sebe (ve tvaru kříže). Proto se magnetron ve starších publikacích nazývá také „elektronka se zkříženým polem“.



Obrázek 1: Magnetron MI 29Г ruské radarové soupravy P-37.



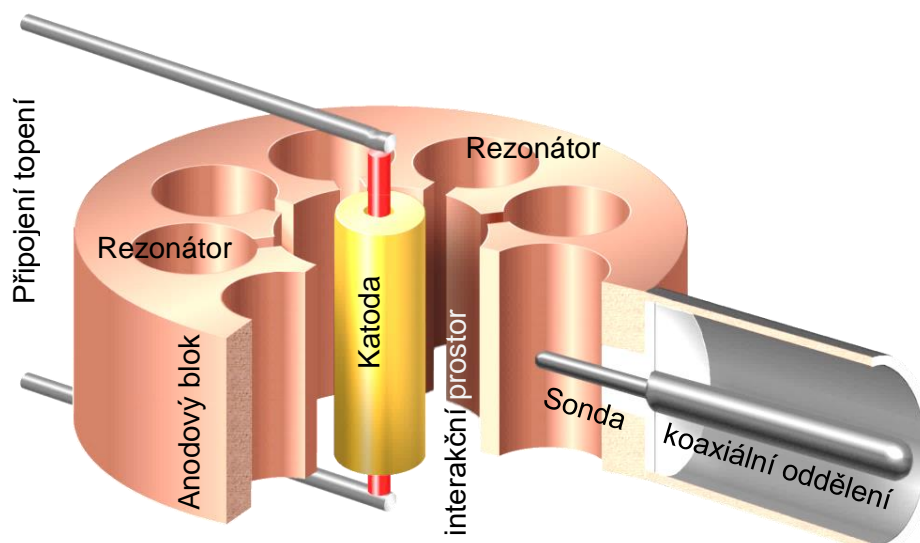
Obrázek 2: Symbol v elektrických obvodech

Struktura magnetronu

Magnetron je vlastně dioda, protože k řízení nepoužívá žádnou mřížku. Anodu tvoří pevný měděný blok. Ve středovém otvoru anodového bloku je válcová katoda, přímo vyhřívána oxidová katoda s vysokou emisivitou, která je uprostřed držena vodiči pro ohřev. Vzhledem k tomu, že anoda je kvůli velkým chladicím plochám obvykle na zemním potenciálu, musí katoda přenášet velmi vysoké záporné napětí. To znamená, že ohříváč musí být také na tomto záporném potenciálu. Jedná se tedy o přímý ohříváč, což znamená, že katoda je přímo připojena k topnému vodiči. Přívodní vodiče musí být dostatečně velké a pevné, aby udržely katodu a topné těleso na místě. Paralelně s katodou je umístěno silné magnetické pole permanentního magnetu.

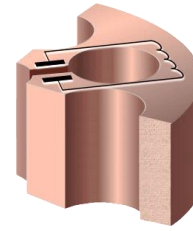
Obsah:

1. Struktura magnetronu
2. Funkce magnetronu
 - Generování a urychlování elektronového proudu
 - Řízení rychlosti elektronů VF polem
 - Hustotní modulace toku elektronů
 - Přenos energie do brzdného elektrického pole VF
3. Přechodné kmitání
4. Pracovní režimy magnetronu
5. Oddělení energie na magnetronu
6. Horní mezní frekvence



Obrázek 3: Model magnetronu v řezu

V anodovém bloku je 8 až 20 dutin, které jsou rezonátory dutin určující frekvenci. Když jeden rezonátor kmitá, vybuzuje to i sousední rezonátor, který kmitá, ale s fázovým zpožděním 180°. Díky tomuto zpoždění od rezonátoru k rezonátoru funguje anodový blok jako samostatná zpožďovací linka. Kvůli tomuto zpoždění se tato konstrukce v některých publikacích nazývá také *“Multicavity Traveling Wave Magnetron”* (Magnetron s více dutinami s putujícími vlnami).



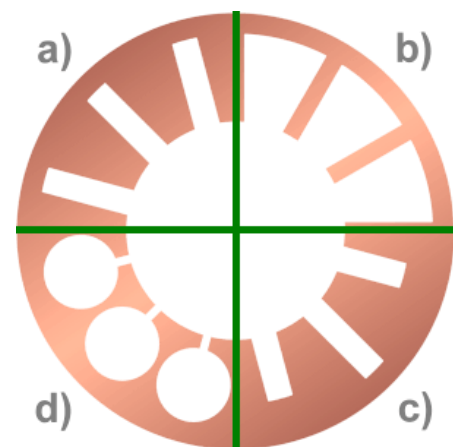
Obrázek 4: Rezonátor v anodovém bloku má funkci paralelního rezonančního obvodu: Stěny anody naproti u štěrbin jsou kondenzátorem, oklika kolem otvoru je indukčností (pouze s jedním závitem).

Tyto rezonátory mají spojení s prostorem mezi anodou a katodou prostřednictvím úzké štěrbin. Účinná plocha anody je tak rozdělena na různé úseky, jejichž počet odpovídá počtu rezonátorů. Prostor mezi anodou a katodou se nazývá interakční prostor. V interakčním prostoru působí na dráhu elektronu elektrostatické pole a magnetické pole.

Možné tvary rezonátorů jsou znázorněny na obrázku 4, který ukazuje čtyři různé tvary anod vždy v jednom kvadrantu.

- Typ slotu
- Typ kruhového sektoru
- Typ *Rising Sun*
- Typ otvoru

Klasická konstrukce je děrová, která je vyvrtána a vyfrézována z masivního měděného bloku. První sériově vyráběný magnetron byl právě tohoto typu. Oba typy drážek jsou rovněž frézované. Frézování z relativně měkké mědi je velmi pracný výrobní proces, protože fréza může najednou odebrat jen velmi malé množství materiálu, aniž by ohnula zbytek materiálu. Za účelem minimalizace těchto frézovacích prací byl vyvinut typ kruhového sektoru. Vyrábí se lisováním měděných tyčí (tedy i tyčového typu) do připravených krátkých drážek. Rezonanční frekvenci těchto dutin lze kontrolovat během výroby a korigovat vyfrézováním zářezů do okrajů pásů. Dnešní magnetrony jsou většinou tyčové, protože jejich výroba je nejlevnější.



Obrázek 5: Tvar anody magnetronu

Princip fungování magnetronu

Stejně jako u všech elektronek s dobou průchodu elektronů lze elektronické procesy spojené s generováním ultravysokofrekvenčních oscilací v magnetronu rozdělit do čtyř fází:

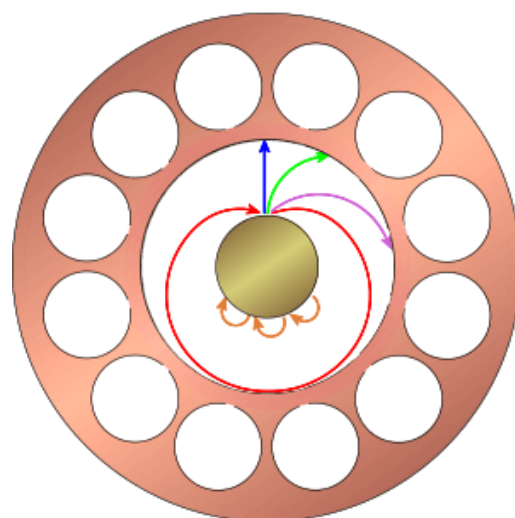
1. proces: Generování a urychlování proudu elektronů.
2. proces: Řízení rychlosti elektronů střídavým pole
3. proces: Hustotní modulace toku elektronů
4. proces: Přenos energie do brzděného střídavého elektrického pole

1. proces: Generování a urychlování elektronového proudu

Pokud se při zahřívání katody přivede na magnetron anodové napětí, elektrony se pohybují po radiálních drahách k anodě. Elektrony jsou urychlovány silným statickým elektrickým polem, a tím absorbují energii. Na obrázku 5 je tmavě modře znázorněna dráha jednoho elektronu bez vlivu magnetického pole; letí po přímé dráze od katody k anodě.

Prochází-li nyní magnetické pole osově prostorem mezi anodou a katodou (tj. pole E a H jsou na sebe kolmá), jsou elektrony vychýleny po epicykloidních drahách. Čím silnější je hustota magnetického toku, tím silnější je výchylka. Hustota toku, při které je dráha elektronů právě tečnou k anodě (znázorněno červeně), se nazývá kritická hustota toku. V praktickém provozním případě je zvolena mnohem vyšší hustota toku, než je kritická (znázorněna oranžově). Elektrony se nemohou dostat k anodě. Ani anodový proud by neprotékal.

Pokud však nemůže protékat žádný anodový proud, pak elektrony nemají dostatek energie k udržení oscilací v rezonátorech navzdory odběru energie. Podstatným zvýšením anodového napětí získají elektrony větší počáteční urychlení směrem k anodě. Čím silnější je anodové napětí, tím rychlejší (tj. energetičtější) jsou elektrony. Magnetické pole pak nemůže na elektrony působit tak dlouho, aby je vychýlilo mimo kritickou dráhu. Tím se anodový proud stává měřitelným. Teoreticky by pak dráha elektronů probíhala přibližně tak, jak je znázorněno v příkladu s fialovou barvou. Tento anodový proud se pohybuje pouze v řádu několika desítek miliampérů, přestože výkony impulzů dosahují megawattů. Je to proto, že anodový proud se kvůli setrvačnosti měřících přístrojů měří pouze jako průměrná hodnota. Špičkový proud je mnohem vyšší. Prakticky by však taková trajektorie mohla nastat pouze v případě, že anoda nemá žádné rezonátory (nebo jsou tyto rezonátory zkratovány, jak je nakresleno na obrázku 6).

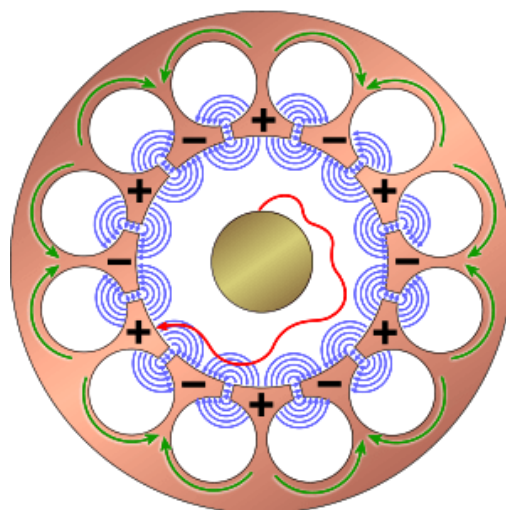


Obrázek 6: Trajektorie elektronu pod vlivem elektrostatického pole a magnetického pole pro různé hustoty magnetického toku.

2. proces: Řízení rychlosti elektronů

Elektrony prolétávající kolem štěrbin dutinových rezonátorů je vybuzují k oscilacím. Již první kmitající rezonátor budí i sousední rezonátor, který však kmitá se zpožděním 180° . Ten na druhou stranu vybuzuje další rezonátor atd. Celá řada rezonátorů tvoří zpožďovací linku. Na tomto zpožďovacím vedení vzniká cirkulující elektromagnetická vlna. Protože magnetické pole této vlny působí pouze uvnitř rezonátorů, v běžícím prostoru se projevuje pouze elektrické pole soustředěné ve štěrbinách rezonátorů a ovlivňuje pohyb elektronů.

Na obr. 6 je uvažováno pouze vysokofrekvenční elektrické pole cirkulující vlny a odpovídající rozložení náboje na anodových segmentech v daném čase. Zelené šipky symbolizují pohyby elektronů v anodovém bloku způsobené RF oscilací. VF pole vznikající v rezonátorových štěrbinách a náboje na anodových segmentech působí jako doplněk k trvale přítomnému statickému elektrostatickému poli.



Obrázek 7: Průběh elektrického pole cirkulační vlny

V důsledku toho mění cirkulační vlna potenciály anodových segmentů na hodnoty, které jsou o něco větší (kladnější) nebo o něco menší (zápornější) než anodový stejnosměrný potenciál. Tyto rozdíly nábojů jsou pro daný okamžik označeny značkami „+“ a „-“.

Elektrony vylétající z katody směrem k momentálně kladněji nabitým anodovým segmentům jsou tak dodatečně urychlovány. Tím se magnetická výchylka doprava zesílí a elektrony získají vyšší tangenciální rychlost.

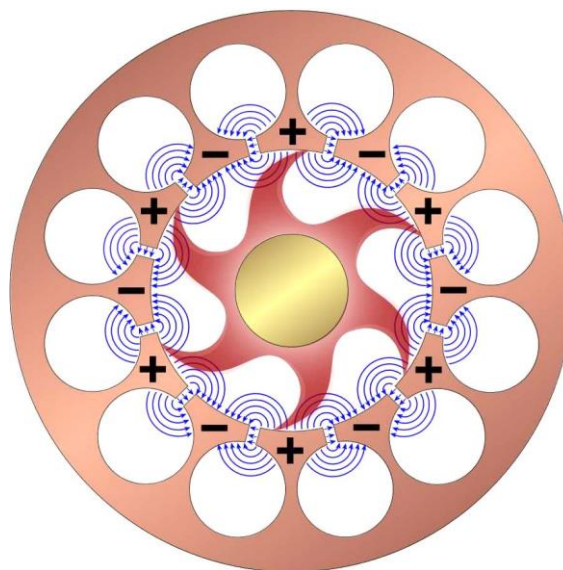
Na druhé straně se zpomalují elektrony letící k aktuálně záporněji nabitým segmentům. Nejsou tak silně vychýleny doprava, a proto dosahují menší tangenciální rychlosti.

3. proces: Hustotní modulace toku elektronů

Po dráze popsané na obr. 5 se však nepohybuje pouze jeden elektron. Katoda jich vyzařuje velmi mnoho do všech směrů. Rozložení je na začátku také velmi rovnoměrné. Pouze vliv elektrických polí rezonátorů způsobuje modulaci rychlosti elektronů.

Vzhledem k rozdílným rychlostem různých skupin elektronů dochází během oběhu elektronů k časovým efektům. Rychlejší elektrony dohánějí pomalejší elektrony. Čím více se přibližují k anodě, tím více se shlukují a výsledkem je hromadění elektronů v podobě otáčejícího se „paprskového kola“.

Protože tato podmínka není statická, protože jak vlna (a tedy i rozložení pole na rezonátorech), tak kolo se špicemi se neustále otáčí, je třeba uvést do souladu tečnou rychlost elektronových špic a rychlost otáčení vlny. Tuto regulaci rychlosti elektronů provádí radarový mechanik nastavením anodového proudu předepsaného v návodu k obsluze.



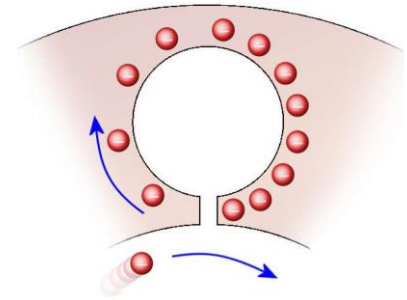
Obrázek 8: Hustotou modulovaný tok elektronů vyjádřený jako rotující „paprskové kolo“

4. proces: uvolnění energie elektronů do VF pole

Pokud se jeden z paprsků nachází na anodovém segmentu, který je střídavým VF polem superponovaným na stejnosměrné anodové napětí nabit záporněji, pak se elektrony zpomalují a uvolňují svou energii do střídavého VF pole. Na své cestě mezi katodou a anodou se elektrony v paprsku několikrát zpomalí, než dosáhnou příslušného (tehdy zápornějšího) anodového segmentu. Při každém zpomalení a také při konečném nárazu na anodu odevzdávají energii vysokofrekvenčnímu kmitání. Díky několikanásobnému zpomalení elektronu je jeho energie optimálně využita a je dosaženo účinnosti až 80 %.

Přechodný proces

Po zapnutí anodového napětí ještě neexistuje žádné vysokofrekvenční pole. Jednotlivý elektron se pohybuje pod vlivem statického elektrického pole anodového napětí a vlivem magnetického pole, jak je znázorněno na obrázku 5 (červená dráha elektronu). Elektronů jsou nosiči náboje: když prolétají mezerou v dutinových rezonátorech, odevzdávají určitou energii.



Obrázek 9: Přechodný proces: Generování tlumeného kmitání jedním

Procházející elektron se také zpomalil: odevzdal energii dutinovému rezonátoru.

Dutinový rezonátor začne prozatím velmi slabě kmitat s vlastní rezonancí. Okamžitě začne také interakce mezi tímto vF polem (s původně malým výkonem) a elektronovou ocelí. Elektronů jsou navíc ovlivňovány střídavým polem a začíná sled interakcí mezi VF polem a elektrony s modulovanou rychlostí popsány v procesech 1 až 4. Velmi rychle je dosaženo maximální amplitudy kmitání.

Například:

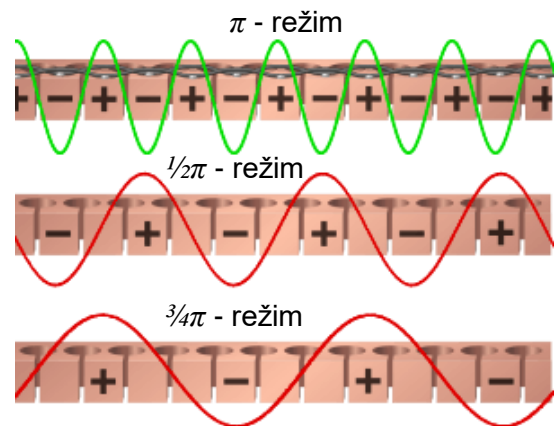
Podrobněji vypadá **přechodný proces** takto: Přestože anoda má ve srovnání s katodou vysoký kladný potenciál (což znamená nedostatek volných elektronů), v kovu je stále dostatek volných elektronů. V klidovém stavu jsou od sebe poměrně konstantně vzdáleny, protože se navzájem odpuzují díky svému zápornému náboji. Nyní proletí mezerou další elektron a navíc odpuzuje okolní klidové elektrony. To ovlivňuje všechny elektrony v okolí díry v anodě. I když elektron už dávno proletěl kolem, chvíli trvá, než se vrátí do klidového stavu. Kolem anodového otvoru vzniká tlumené kmitání rezonanční frekvence.

Oscilace bohužel nemá předvídatelnou fázi. Každé kmitání má náhodnou fázi. Vysílací impulsy generované magnetronem proto nejsou vzájemně kkoherentní.

Pracovní režimy magnetronu

Pracovní frekvence závisí především na rozměrech rezonátorů a na prostoru mezi anodou a katodou. Protože jsou však jednotlivé rezonátory spojeny přes běžící prostor, existuje pro celý systém (zpožďovací vedení) několik rezonančních frekvencí.

Obrázek 10 ukazuje tři ze čtyř možných režimů magnetronu s 12 rezonátory. Pokud magnetron pracuje v některém z dalších režimů ($3/4\pi$, $1/2\pi$, $1/4\pi$), snižuje se výkon nebo účinnost a oscilační frekvence.



Obrázek 10: Oscilační režimy magnetronu (anodové segmenty jsou zobrazeny „odvinuté“).

Pro dosažení stabilního provozu v optimálním režimu π , jsou možná dvě konstrukční opatření::

1. **Zkratovací kroužky na anodových segmentec:**
Sudé i liché segmenty jsou propojeny zkratovacími kroužky. V režimu π mají tedy anodové segmenty stejný potenciál. Ostatní režimy jsou potlačeny vyrovnávacími proudy přes tyto zkratovací kroužky.
2. Použití **rezonátorů s různými vlastními frekvencemi**. Jednou z takových variant je anoda typu *Rising Sun*.

Typ *Rising Sun* má různě dlouhé otvory. V daném příkladu je rezonanční frekvence každého druhého rezonátoru na třetí harmonické požadované pracovní frekvence v režimu π , tj. trojnásobku základní frekvence. Obvykle tato rezonanční frekvence (protože je lichým násobkem pracovní frekvence) podporuje okraje kmitání v režimu π . Například pokud magnetron pracuje v režimu $1/2\pi$, pak se na proudovém toku oscilací podílejí dva rezonátory, které jsou spolu těsně spřaženy. Jeden rezonátor by nyní pracoval na 2. harmonické, druhý na 6. harmonické. Protože tento menší rezonátor nyní pracuje na sudém násobku a stále musí mít fázový posun 180° kvůli pevné vazbě, je nyní ve fázovém protikladu ke svým sousedním rezonátorům. Tím se již tak nepříznivá účinnost pro špatný režim stává ještě nepříznivější, a pracovní podmínky se tak ještě zhoršují, dokud se tato oscilace nezmění na režim π .



Obrázek 11: Magnetron rozříznutý, zkratovací kroužky jsou jasně viditelné

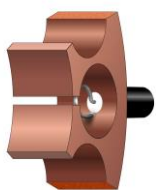
Aby vůbec mohly vzniknout oscilace v jiném než π -režimů, musí počet rezonátorů odpovídat tomuto režimu. Například pro režim $3/4\pi$ musí být počet rezonátorů dělitelný 6, aby v tomto režimu vznikla cirkulační vlna. Počet možných módů tedy závisí na počtu rezonátorů.

Odpojení energie na magnetronu

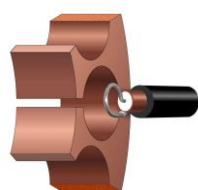
VF energii lze z magnetronu odebírat pomocí vazební smyčky. Při frekvencích pod 10 GHz je tato smyčka vytvořena ze středního vodiče koaxiálního kabelu a nachází se uvnitř rezonátoru (obr. 11). Při vyšších frekvencích je efektivnější umístit tuto vazebnou smyčku mimo rezonátor (obr. 12).

Napájení oddělovače VF napětím segmentu je znázorněno na obr. 13. Linka také detekuje magnetické pole vyskytující se mezi rezonátory. Možné je také spojení se zkratovacím kroužkem (obr. 14). Způsob vyvedení energie koaxiálním kabelem je výhodný, protože průchod anodovým blokem musí být vzduchotěsný (vakuová trubice!). Tento koaxiální kabel však může přímo napájet vlnovod. Přímé oddělování přes štěrbinu je běžné i při vysokých frekvencích (a tedy malých rozměrech vlnovodu) (obr. 15). Spojení vlnovodu musí být vzduchotěsně uzavřeno křemenným okénkem s otvorem.

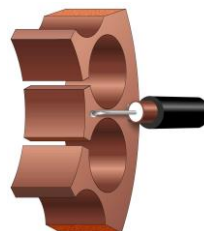
Různé způsoby vyvedení energie z magnetronu



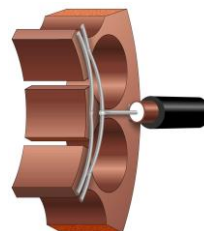
Obrázek 12: Vazba jako vazební smyčka v dutině rezonátoru (velmi těsná vazba)



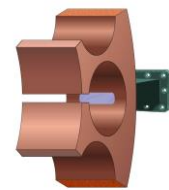
Obrázek 13: Vazba jako vazební smyčka nad dutinou rezonátoru (volnější vazba)



Obrázek 14: VF napěťová odbočka na stěně rezonátoru



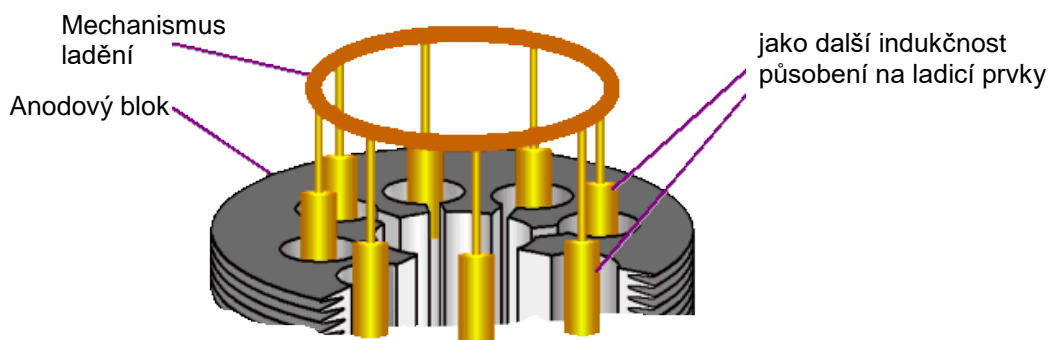
Obrázek 15: VF napěťová odbočka na zkratovacím kroužku



Obrázek 16: Oddělování pomocí vlnovodu

Změna frekvence na magnetronu

Laditelné magnetrony umožňují přesnější vysílací frekvenci v rámci frekvenčního pásma určeného konstrukcí. Změna rezonanční frekvence je způsobena kapacitními nebo induktivními mechanickými změnami rezonátorů.



Obrázek 17: Indukční ladění („Ladění s trnovou korunou“)

Kapacitní ladění je možné změnou vzdálenosti mezi zkratovacími tyčemi, například vložením kroužku mezi zkratovací tyče. Tento typ ladění se nazývá cookie-cutter tuning, ale používá se jen zřídka. Obvykle se do všech dutinových rezonátorů současně vkládají indukční ladicí písky, které jsou připevněny k rámu a lze je nastavovat zvenčí. Tento typ se nazývá „ladění s trnovou korunou“ („Crown-of-thorns tuning“). Při tomto ladění lze dosáhnout rozsahu ladění až 1,5 : 1. Hlavním problémem všech ladicích variant je přenos mechanického pohybu do vakuového prostoru trubice.

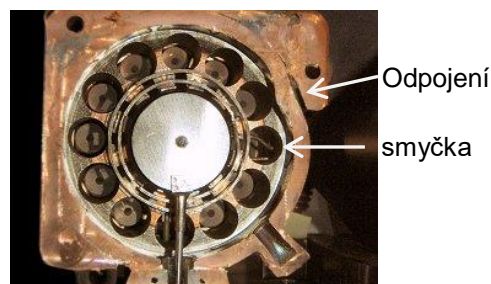
Příkladem laditelného magnetronu je M5114B vysílače ASR-910. Protože vysílač ASR-910 může pracovat na různých přiřazených frekvencích, aby se snížilo vzájemné rušení, musí být pracovní frekvence vysílače laditelná. Tento magnetron je vybaven ladicím mechanismem pro přesné nastavení vysílací frekvence ASR-910.

Obrázek 18 ukazuje indukční ladicí prvky magnetronu typu TH3123. Rezonátor za přívody pro topné napětí a rezonátor s oddělovací smyčkou nejsou laditelné! To ukazuje nevýhodu ladění: tyto dva rezonátory musí být širokopásmovější než ostatní rezonátory. Tím se snižuje účinnost magnetronu a změna frekvence je možná jen ve velmi úzkém rozmezí.

Jen na okraj: magnetron na obrázku 17 byl otevřen frézou. Ohnutá část jinak kruhového vnějšího okraje anody těsně nad oddělovací smyčkou ukazuje, jak obtížné je nastavit frézku pro práci s velmi měkkou mědí, aniž by se materiál ohnul.

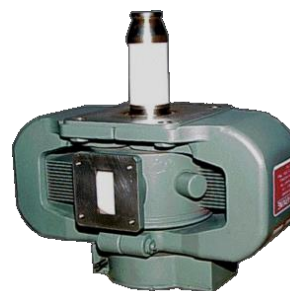


Obrázek 19: Magnetron M5114B zařízení ASR-910



Napájení topného napětí

Bild 18: Resonatoren eines Magnetrons (Loch-Typ) mit induktiven Abstimmelementen



Obrázek 20: Magnetron VMX 1090, použitý v PAR-80. Tento magnetron obsahuje i permanentní magnety potřebné k práci.