



Koaxiální keramické filtry

KERAMICKÉ PRVKY pro RF a mikrovlnnou TECHNIKU

Keramika je ve vysokofrekvenční elektrotechnice velmi rozšířeným materiálem. Ovlivnila zásadním způsobem její rozvoj a pro mnohé aplikace je dodnes nepostradatelným materiálem. K základním vlastnostem keramiky patří vysoká stabilita mechanických i elektrických parametrů. Odolává chemikáliím, nekoroduje, nestárne vlivem extrémních teplot ani působením záření. Dříve se používala zejména pro konstrukční a izolační prvky.

Velkou skupinu keramických materiálů pro vysokofrekvenční techniku dnes tvoří keramická dielektrika. Ta se obecně rozdělují do tří skupin podle permitivity. V mikrovlnné oblasti se téměř výhradně používají dielektrika typu I, tedy lineární dielektrika. K nejdůležitějším parametrům těchto dielektrik patří relativní permitivita, ztrátový činitel a jejich teplotní a frekvenční závislosti. Hodnota permitivity je ve velkém rozsahu kmitočtů konstantní a její teplotní závislost je u kvalitních mikrovlnných dielektrik prakticky nulová. Jejich hlavní složku tvoří zejména titanáty, zirkonáty, tantaláty nebo niobáty. Často jde o pevné roztoky různých sloučenin, z nichž každá má odlišnou teplotní závislost permitivity. Poměrem složek je možno zvolit takovou teplotní závislost permitivity, aby byl vykompenzován teplotní chod nejen keramického rezonančního prvku, ale i celého zařízení.

Hodnota relativní permitivity je důležitá i z pohledu miniaturizace, protože vlnová délka se v dielektriku zkracuje v poměru odmocniny permitivity. Pro miniaturní zařízení se tedy používají materiály s vyšší permitivitou. Tyto materiály ale většinou vyka-

zují vyšší ztráty, a proto je volba typu keramického dielektrika vždy určitým kompromisem. Ztrátový činitel mikrovlnných dielektrik roste s kmitočtem. Skupina dielektrik s permitivitou od 20 do 40 má při kmitočtu 10 GHz ztrátový činitel od $1 \cdot 10^{-4}$ do $3 \cdot 10^{-4}$, zatímco skupina s permitivitou od 70 do 100 má při stejném kmitočtu ztráty až desetkrát vyšší. Pro některé aplikace ale ani hodnota ztrátového činitele $2 \cdot 10^{-3}$ nemusí být na závadu. V oblasti mikrovlnných kmitočtů se ale dielektrické ztráty častěji vyjadřují pomocí tzv. nezatíženého činitele kvality dielektrického rezonátoru Q_0 nebo Q_U (viz. níže) jehož hodnota je rovna převrácené hodnotě ztrátového činitele. Hlavní aplikace keramických mikrovlnných dielektrik jsou pro dielektrické rezonátory, koaxiální rezonátory, kmitočtové filtry, antény, substráty a kondenzátory malých kapacit.

Dielektrické rezonátory.

Jedná se o keramický nepokovený váleček, ve kterém při rezonanci vzniká stojatá vlna vlivem diskontinuity permitivity na rozhraní dielektrikum-vzduch. Vlnová délka stojaté vlny je oproti vzduchovému dutinovému rezonátoru zkrácena přibližně v poměru odmocniny relativní permitivity keramiky. Většinou se využívá vlna TE_{010} , na kterém se dosahuje nejlepšího činitele Q, ale ve filtrech je možno s výhodou

využít i více vidů současně. Dielektrický rezonátor lze umístit na plošný spoj do blízkosti budícího mikropásku, a to buď přímo na desku nebo s použitím keramické podložky. Vzhledem k tomu, že elektromagnetické pole není soustředěno jen v rezonátoru, ale určitá část je rozložena i vně, musí se okolí rezonátoru omezit vodivými stěnami (dutinou). Rezonanční frekvence lze jemně doladovat přiblížováním kovové plochy k rezonátoru (např. šroubu k horní podstavě keramického válečku). Se změnou teploty dochází vlivem délkové teplotní roztažnosti ke zvětšení rozměrů jak keramiky, tak i kovových stěn, a tím ke zvětšení vlnové délky a snížení rezonanční frekvence. Teplotní závislost permitivity musí tedy být záporná (permitivita se musí se vzrůstající teplotou snižovat), aby se rezonanční frekvence dielektrického rezonátoru a celého obvodu pokud možno neměnila. Lze kompenzovat i teplotní závislosti dalších prvků mikrovlnného obvodu včetně ladicích prvků. Ideálním stavem by měla být nulová teplotní závislost obvodu v celém pracovním rozsahu teplot.

Teplotní závislost rezonanční frekvence dielektrického rezonátoru TC₀ lze přesně měřit. Používanou jednotkou je ppm/°C. Například u dielektrického rezonátoru s teplotní závislostí 1 ppm/°C, rezonujícího na 10 GHz se při nárůstu teploty o 1°C zvýší rezonanční frekvence o 10

kHz. Některá mikrovlnná dielektrika je možno vyrábět i s lepší tolerancí než 1 ppm/°C. Další již zmíněnou charakteristikou keramiky jsou dielektrické ztráty. Rezonátor se umístí do kovové dutiny a vybudí do rezonance. Z rezonanční křivky je možno vypočítat nezatížený činitel kvality, Q_0 či Q_U , který je úměrný převrácené hodnotě $tg(\delta)$. Vzhledem k tomu, že u většiny mikrovlnných dielektrik je Q_U pro frekvence nad 10 GHz nepřímo úměrný frekvenci, používá se též parametr Q_{0f} s jednotkou THz, který charakterizuje kvalitu dielektrika při vysokých frekvencích. U kvalitních keramických dielektrik se běžně dosahuje hodnot 50 THz, tedy na frekvenci 10 GHz činitele kvality 5000. Existují materiály s hodnotami i třikrát vyššími. Dielektrické rezonátory se používají ve stabilních oscilátorech nebo ve filtrech pro rozsah frekvencí od 1 GHz do 25 GHz i více. Hlavní předností je zmenšení rozměrů oproti rezonátorům se vzduchovým dielektrikem a možnost teplotní kompenzace. Používají se i rezonátory ve tvaru pokoveného kvádry s dominantním vlnem TE_{101} . Jejich výhodou je omezení pole na vnitřní prostor rezonátoru, ale hodnota Q dramaticky klesá právě vlivem vodivostních ztrát v pokoveném povrchu.

Koaxiální rezonátory s vlnem TEM.

Koaxiální vedení o délce rovné lichému nebo sudému ná-

sobku čtvrtiny vlnové délky se chová jako paralelní resp. sériový rezonanční obvod. Zvětšení permitivity dielektrika koaxiálního vedení má za následek zmenšení délky koaxiálního rezonátoru. Keramické koaxiální rezonátory se vyrábí buď s kruhovým nebo častěji se čtvercovým průřezem, což je pro montáž výhodnější. Nejběžnější jsou čtvrtvlnné, na konci zkratované rezonátory, ale používají se i rezonátory půlvlnné, které mají oba konce otevřené. Výsledný činitel jakosti je dielektrickými ztrátami kvalitní keramiky ov-

filtrů vhodná pro RF pásma, tzv. SAW filtry, pracují také s mechanickou vlnou. Nepoužívá se u nich keramika, ale monokrystaly.

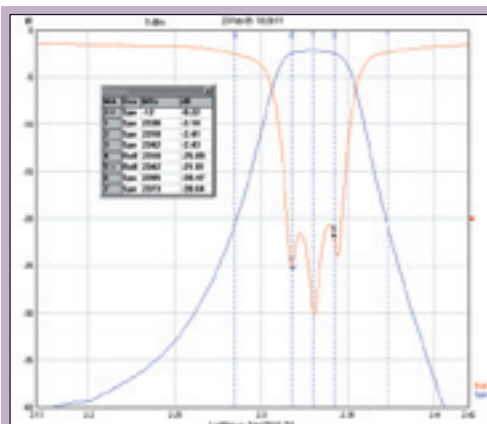
Keramické dielektrické rezonátory lze použít jak ve vlnodvých filtrech, tak ve filtrech s vázanými dutinami. Výhodou je opět zmenšení rozměrů při zachování dobrých vlastností filtru. Keramická dielektrika se používají i v koaxiálních filtrech typu dolní propust. Jde vlastně o koaxiální příčkový člunek, kde podélné indukčnosti jsou realizovány úsekem

pu pásmová propust je charakterizován střední frekvencí F_0 , šířkou pásma B (např. pro pokles 3 dB), zvlněním útlumu v propustném pásmu, útlumem odrazu (nebo činitelem odrazu či PSV) a parametry nepropustného pásma. Ty mohou být definovány nejrůznějšími způsoby – u symetrických filtrů například maximální šířkou pásma pro útlum 40 dB nebo předepsáním frekvenčních pásem, na kterých má být dodržen určitý útlum apod. Pásmové propusti s koaxiálními rezonátory se navrhuji podobně jako vázané LC paralelní

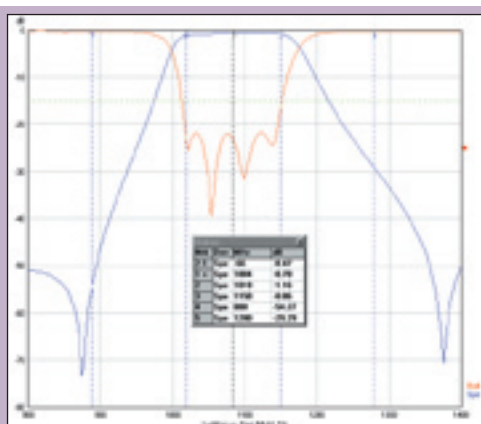
zonátorů. Frekvence rezonátorů a velikosti vazeb se u kvalitních filtrů doladují odbroušením pokovení, což je patrné z obr. 1.

Na obr. 2 je charakteristika třípólového filtru (filtr se třemi koaxiálními rezonátory) pro frekvenci 2330MHz s relativní šířkou pásma asi 1%, přičemž vložený útlum nedosahuje ani 2,5 dB. Útlum odrazu v propustném pásmu je lepší než 20 dB a zvlnění je okolo 0,2 dB. Naproti tomu lze realizovat kvalitní filtry s velkou šířkou pásma při dostatečné strmosti. Na obr. 3 je čtyřpólový filtr se střední frekvencí 1084MHz s relativní šířkou pásma přes 12%. Strmost filtru je zvýšena nulami přenosu na kmitočtech okolo 900 a 1380 MHz. Filtr má vložený útlum okolo 1 dB a útlum odrazu lepší než 20 dB. Na obr. 4 je ukázka šestipólového velmi strmého filtru, který má na trojnásobku šířky pásma B útlum okolo 60dB.

Filtry typu pásmová zádrž mají – zjednodušeně řečeno – převrácenou kmitočtovou charakteristiku přenosu. Definuje se šířka zádržného pásma a minimální potlačení. Většinou je důležité i propustné pásmo, ve kterém musí být dodržen vložený útlum, zvlnění a útlum odrazu. S koaxiálními rezonátory lze realizovat velmi strmé filtry. Typickým použitím jsou duplexery, nutné k současnému provozu



Obr. 2 Charakteristika třípólového filtru s šířkou pásma 1%



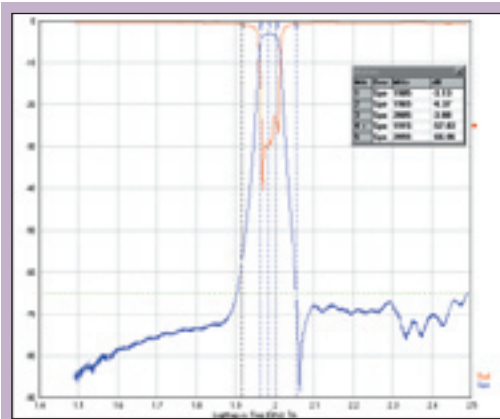
Obr. 3 Charakteristika čtyřpólového filtru s šířkou pásma 12%

livně méně, důležitější jsou vodivostní ztráty ve vnitřním vodiči a kvalita zkratu. Vnitřní vodič je tvořen prokovenou dírou v keramickém profilu, a proto musí být povrch keramiky dostatečně kvalitní, aby se u pokovení dosáhlo co nejvyšší vodivosti na rozhraní keramika-kov. Používá se zejména stříbro, pro méně náročné aplikace je vhodná i měď. Nezatížený činitel kvality Q_0 závisí také na průřezu rezonátoru a na frekvenci, kde ovšem díky zmenšující se hloubce vniku ztráty klesají. U průřezu 6x6mm se na frekvenci 1 GHz dosahuje hodnoty Q_0 okolo 600. Keramické koaxiální rezonátory se používají do oscilátorů a jsou důležitým prvkem keramických filtrů.

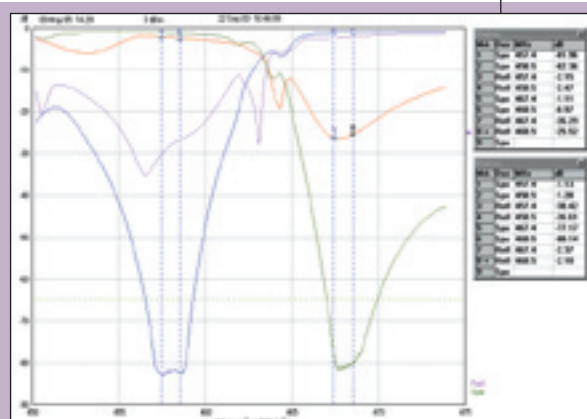
vedení s vysokou impedancí příčné kapacity tvoří úseky s malou impedancí.

Nejrozšířenější jsou filtry s koaxiálními keramickými rezonátory.

rezonanční obvody. Vzhledem k vysokému nezatíženému činiteli jakosti Q_0 koaxiálních rezonátorů (ve srovnání s LC filtry) lze dobře realizovat pásmové



Obr. 4 Charakteristika šestipólového strmého filtru



Obr. 5 Duplexer typu pásmová zádrž

Keramické dielektrické filtry.

Keramické dielektrické filtry se často zaměňují s piezokeramickými filtry, u kterých se ale využívá mechanických kmitů a používají pro podstatně nižší frekvenční pásma. Jiná skupina

ry. Vzhledem k permitivitám keramických dielektrik je vhodný rozsah frekvencí od 300MHz do 6GHz, nebo i výše. Jednoduše lze realizovat filtry typu pásmová propust i pásmová zádrž, případně jejich kombinace. Filtr ty-

propusti i s malou relativní šířkou pásma. Filtry typu pásmová propust se často vyrábějí z keramických vícerezonátorových bloků, kde se vazby nastavují vhodným přizpůsobením pole mezi jednotlivými středními vodiči re-

vysílače a přijímače do společné antény. Na obr. 5 je ukázka duplexeru pro pásmo 460MHz s odstupem kanálů 10MHz a potlačením opačného kanálu o téměř 80dB.

Ing. Vladimír Skácel