

# Dielektrické rezonátory a filtry pro RF a MW frekvence

Ing. Vladimír Skácel, Ing. Jana Fiedlerová  
T-Ceram, s. r. o., Hradec Králové, [www.t-ceram.com](http://www.t-ceram.com)

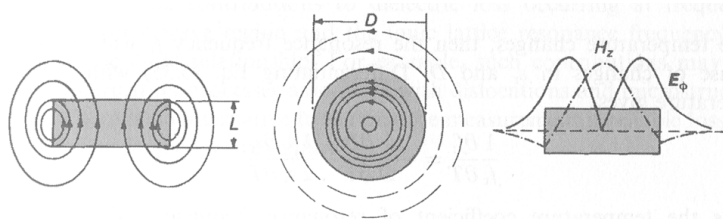
Keramiky patří k nejlepším dielektrickým materiálům, které se ve vysokofrekvenční a mikrovlnné technice používají. K základním vlastnostem keramiky patří vysoká časová stabilita mechanických i elektrických parametrů. Odolává chemikáliím, nekoroduje, nestárne vlivem extrémních teplot ani působením záření. Běžně se keramiky používá pro substráty, konstrukční prvky nebo jako dielektrikum keramických kondenzátorů. Tento příspěvek se věnuje aplikacím nízkoztrátových keramických dielektrik s řízenou teplotní závislostí permitivity.

Nízkoztrátové dielektrikum, u kterého lze technologickým postupem nastavit přesnou hodnotu teplotní závislosti permitivity je ideálním materiálem pro rezonanční prvky. K typickým aplikacím patří dielektrické rezonátory, koaxiální rezonátory, dielektrické filtry, substráty pro úzkopásmové obvody jako jsou například planární filtry nebo jiné rezonanční prvky. Bylo vyvinuto několik typů keramických materiálů, u kterých lze technologicky řídit teplotní závislost permitivity. Většina teplotně kompenzovaných keramických dielektrik je tvořena pevným roztokem dvou složek, z nichž jedna má kladnou a druhá zápornou teplotní závislost permitivity. Důležité je, aby obě složky byly mísitelné v dostatečně velkém poměru a aby bylo možno z připravené směsi vyrobit kvalitní slinutou keramiku. Z chemického hlediska se nejčastěji jedná o titanáty, zirkonáty, niobáty nebo tantaláty [1]. Keramické materiály na bázi tantalu mají nejnižší dielektrické ztráty, ale z důvodu vysoké ceny tantalu je jejich použití omezené.

## Dielektrické rezonátory

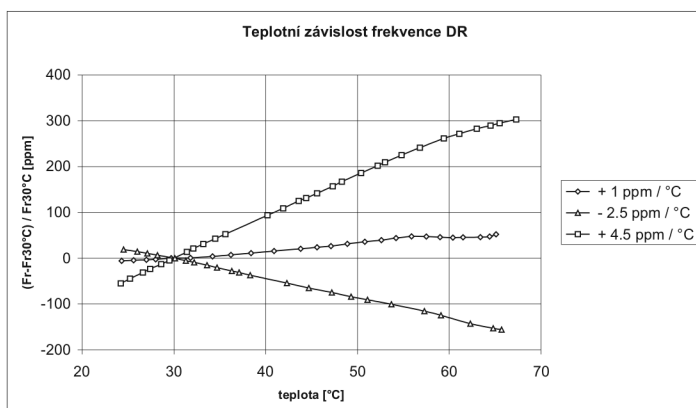
Dutinový rezonátor je tvořen kovovou válcovou, případně rektangulární dutinou. Stěny dutiny musí mít co nejlepší vodivost, proto je jejich povrch leštěný a pokovený stříbrnou leštěnou vrstvou. Vodivost povrchu je rozhodující pro dosažení vysokého činitele kvality dutinového rezonátoru.

Naproti tomu dielektrický rezonátor nemá žádnou vodivou plochu. Je to válec z dielektrického materiálu, jehož výška je menší než průměr. Obvyklý poměr výšky a průměru rezonátoru je od 0,3 do 0,5. Stojatá vlna se v dielektrickém rezonátoru vytvoří vlivem diskontinuity permitivity na rozhraní dielektrikum-vzduch. Vlnová délka stojaté vlny je oproti vzduchovému dutinovému rezonátoru zkrácena zhruba v poměru odmocniny permitivity dielektrika. To znamená výrazné zmenšení rozměru rezonátoru. Činitel kvality dielektrického rezonátoru je určen především ztrátami v dielektriku. Kvalita povrchu není rozhodující a rezonátor nemusí být leštěný. Ztráty v dielektriku jsou sice vždy vyšší, než ztráty ve vzduchu, ale u dielektrického rezonátoru se neuplatňují vodivostní ztráty, protože dielektrický rezonátor nemá žádné vodivé plochy.



Většina energie elektromagnetického pole je při rezonanci lokalizována v dielektrickém rezonátoru. Určitá část energie je ale rozprostřena v okolí rezonátoru, jak je zřejmé z obrázku vlevo. Proto lze dielektrický rezonátor snadno navázat do obvodu. Rezonanční frekvenci lze ovlivňovat vodivými a dielektrickými prvky v okolí rezonátoru. Nejvyšší činitel kvality se dosahuje na vidu TE01d, přičemž vodivé i dielektrické prvky by měly mít dostatečnou vzdálenost od rezonátoru, protože snižují činitel kvality [2]. Velké rezonátory se vyrábějí s dírou uprostřed, kde montážní plastový šroub Q příliš nezhoršuje.

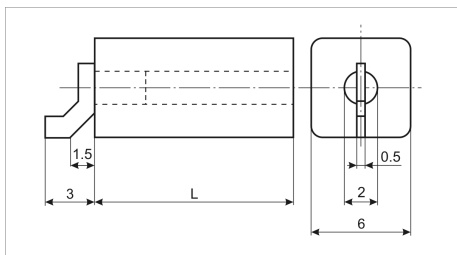
Se změnou teploty dochází vlivem délkové teplotní roztažnosti keramiky ke zvětšení rozměrů rezonátoru, a tím ke snížení rezonanční frekvence. Veškeré prvky v okolí rezonátoru mění své rozměry s teplotou také, což opět ovlivňuje rezonanční frekvenci. A zde se právě ukazuje hlavní výhoda dielektrik s řízeným teplotním chodem. Pro konkrétní obvod lze



experimentálně ověřit, jaká hodnota teplotní závislosti rezonanční frekvence dielektrického rezonátoru je optimální. Např. rezonátor z materiálu E-37 (relativní permitivita je 37 +/- 1) lze vyrábět s hodnotami teplotní závislosti rezonanční frekvence od -6 ppm/°C až do +9 ppm/°C. Reprodukovatelnost výrobků v jedné dávce je asi +/- 1 ppm/°C. Linearita teplotní závislosti je u materiálu E-37 vynikající.

Dielektrické materiály E-37, E-20 a E-11 mají velmi nízké dielektrické ztráty. V závislosti na frekvenci dosahují hodnot přibližně  $2-3 \times 10^{-4}$ . Dielektrický rezonátor z materiálu E-37 dosahuje na frekvenci 9 GHz hodnotu nezátíženého činitele kvality  $Q_u$  vyšší než 5 000 [3]. Dalo by se tedy očekávat, že na frekvenci 900 MHz lze dosáhnout  $Q_u$  okolo 50 000. Závislost činitele kvality na frekvenci je ale lineární jen ve frekvenčním rozsahu asi 4 GHz až 16 GHz. Na vyšších, ale i na nižších frekvencích se uplatňují další ztrátové mechanismy, proto u dielektrického rezonátoru na frekvenci 900 MHz lze dosahovat  $Q_u$  maximálně 35-40 tisíc. Pro nejvyšší hodnoty  $Q_u$  je nutno použít suroviny o čistotě 99,99%, jejichž cena je velmi vysoká.

## Koaxiální rezonátory



Nízkoztrátová keramická dielektrika lze velmi dobře využít pro koaxiální rezonátory. Z keramického materiálu se nejprve vyrobí koaxiální prvek kruhového nebo čtvercového profilu. Častěji se používá profil čtvercový, který umožňuje lepší montáž. Díra je většinou kruhová. Vnější povrch rezonátoru i povrch díry se pokoví kvalitní stříbrnou vrstvou. Jeden konec koaxiálního rezonátoru musí zůstat vždy nepokovený, druhý konec může být buď pokovený (čtvrtvlnné rezonátory) nebo nepokovený, tedy otevřený (půlvlnné rezonátory). Koaxiální rezonátor je většinou opatřen kontaktem, aby ho bylo možno jednoduše navázat do obvodu. Koaxiální

rezonátor rezonuje na vidu TEM. Na rozdíl od výše uvedeného nepokoveného dielektrického rezonátoru lze rezonanční frekvenci koaxiálního rezonátoru definovat velmi přesně, protože pole je vlivem precizního pokovení téměř zcela uzavřeno uvnitř koaxiálního rezonátoru. Vlastní rezonanční frekvence (Self Resonant Frequency) je určena délkou koaxiálního vedení „L“ (viz. obr.) a permitivitou dielektrika. Při měření se uplatňují parazitní vlastnosti kontaktu, způsob vazby do obvodu a vyzařování otevřených konců. Pokud při měření rezonance použijeme galvanickou vazbu, vlastní rezonanční frekvence (SRF) bude specifikována s přesností lepší než 0,1%. Nevýhodou definice SRF je to, že nezohledňuje charakteristickou impedanci rezonátoru. Koaxiální rezonátor je většinou navázán do obvodu malou sériovou nebo paralelní kapacitou, jejíž hodnotu není možno precizně stanovit vzhledem k parazitním prvkům celého obvodu. Někdy je proto výhodné měřit rezonanci koaxiálního rezonátoru zatíženého přesně definovanou kapacitou. Takto měřená rezonanční frekvence bude vždy nižší, než SRF, ale může lépe charakterizovat skutečné vlastnosti rezonátoru včetně jeho charakteristické impedance a vlivu kontaktu.

Činitel kvality koaxiálního rezonátoru je výrazně degradován vodivostními ztrátami ve stříbrné vrstvě. Tyto ztráty není možno nijak omezit. Lepší vodič než je stříbro neexistuje, pokud neuvažujeme použití supravodičů. Zvětšení tloušťky stříbrné vrstvy nepřinese zlepšení, protože stínící proudy jsou vlivem skin efektu lokalizovány do oblasti rozhraní mezi keramikou a stříbrnou vrstvou. Leštění povrchu keramiky také nepřináší výrazné zlepšení. Jediným způsobem jak zlepšit činitel kvality je zvětšení profilu koaxiálního rezonátoru, tedy zejména průměru jeho středního vodiče. U rezonátoru s profilem 6x6 mm a dírou o průměru 2 mm lze na frekvenci 900 MHz počítat s činitelem kvality asi 600, což je sice hodnota řádově horší, než u výše popsaných dielektrických rezonátorů, ale několikanásobně vyšší, než u klasických induktorů nebo u planárních rezonátorů. To je také jeden z důvodů, proč se koaxiální rezonátory používají jako koaxiální induktory s vysokým činitelem kvality. Pro toto použití musí být zvolen rezonátor, jehož SRF je alespoň o 20% nad pracovní frekvencí koaxiálního induktoru.

## Dielektrické filtry

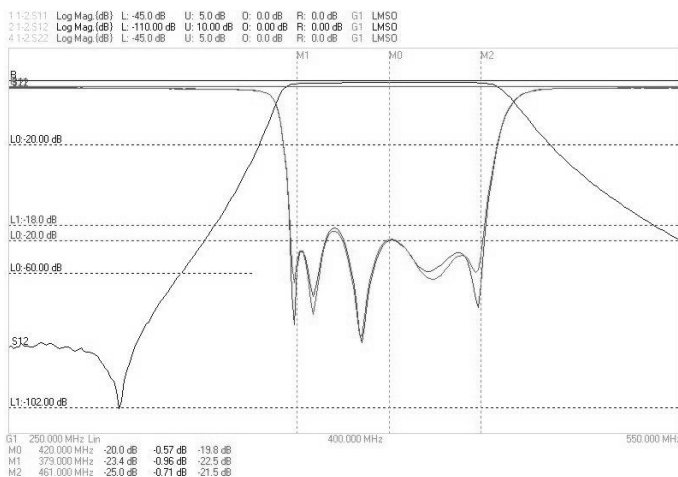
Teplotně kompenzovaná keramická dielektrika jsou ideálními materiály pro výrobu dielektrických filtrů. Nepokovené dielektrické válcové rezonátory lze použít pro dutinové filtry typu pásmová propust nebo pásmová zádrž, ale také pro vlnododové filtry. Koaxiální rezonátory se používají pro koaxiální dolní propusti, a pro filtry typu pásmová propust nebo pásmová zádrž. Dielektrické koaxiální (TEM) filtry mají mnoho výhod, ale také některé nevýhody. Následující tabulka porovnává některé vlastnosti různých typů filtrů.

Typ filtru / vlastnosti	rozměry	ztráty	kusová cena	min. množství	doba vývoje	cena vývoje
Dutinové, vlnododové	velké	velmi malé	vysoká	malé	střední	vysoká
Dielektrické TEM	střední	malé	střední	malé	krátká	nízká
Planární	střední	vysoké	nízká	střední	střední	střední
LC filtry	střední	vysoké	střední	malé	krátká	nízká
Helix Filtry	střední	střední	střední	malé	střední	střední
SAW Filtry	malé	velmi vysoké	velmi malá	velké	dlouhá	velmi vysoká

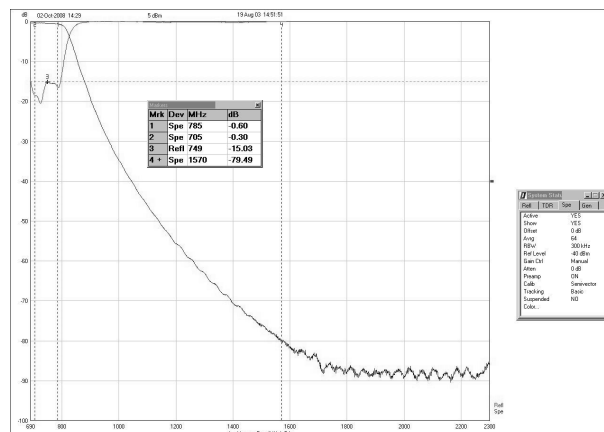
Dielektrické filtry typu pásmová propust lze realizovat například jednotlivými koaxiálními rezonátory s kapacitními vazbami. Prakticky se jedná o kapacitně vázané paralelní rezonanční obvody. Toto řešení je vhodné zejména pro filtry s relativní šířkou pásma asi 3-6%  $F_0$ . Pro větší šířky pásma má kapacitní vazba negativní vliv na potlačení filtru pro kmitočty nad propustným pásmem. Se zvětšujícími se vazebními kapacitami se filtr začíná chovat více jako dolní propust. Úzkopásmovější filtry lze s kapacitními vazbami realizovat velmi obtížně především proto, že hodnoty kapacit jsou velmi malé.

Úzkopásmové propusti lze také realizovat keramickými bloky. Toto řešení bylo navrženo již v roce 1986 ve výzkumném oddělení firmy Murata [4]. V pokoveném keramickém bloku jsou vytvořeny rezonanční (prokovené) a vazební (neprokovené) díry. Velikostí rezonančních a vazebních děr a jejich vzájemnou polohou lze řídit vlastnosti propustného i zádržného pásma. Střední frekvence propustného pásma je určena délkou jednotlivých rezonátorů.

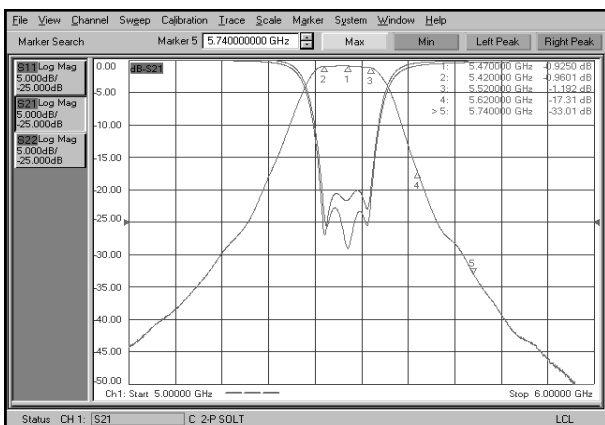
Následující obrázky ukazují příklady filtrů realizovaných ve firmě T-Ceram.



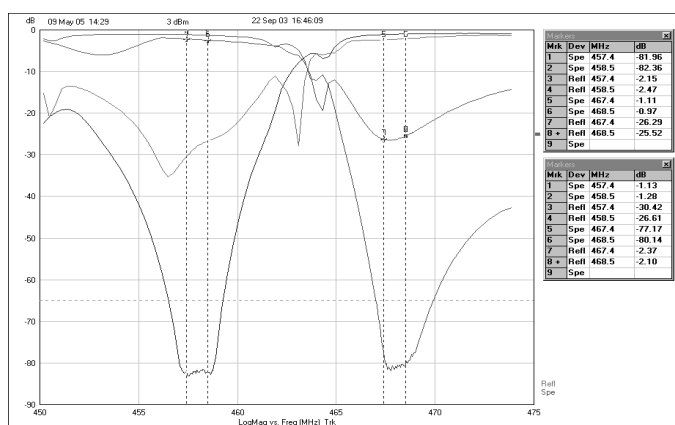
Dielektrický šestipólový filtr s kapacitními vazbami



Koaxiální dolní propust



Dielektrický třípólový filtr, vazby EMpolem



Dielektrický Notch duplexer

## LITERATURA

- [1] Moulson, A.; Herbert, J.: Electroceramics, Wiley, 2003
- [2] Kajfez, D.; Guillon, P.: Dielectric Resonators, Noble publishing, 1998
- [3] <http://www.t-ceram.com/ceramic-materials.htm>
- [4] Wakino, K.; Murata.: High frequency dielectrics and their applications, SAF-86 proceedings, PA, USA, 1986