

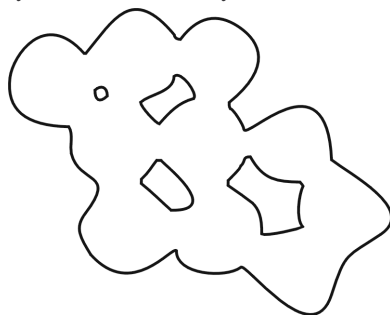
# Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice

Ing. Vladimír Skácel, Ing. Jana Fiedlerová, Ing. Karel Nejezchleb CSc.  
T-CERAM s.r.o., Libřice 60, skacel@t-ceram.com, www.t-ceram.com

Keramika je obecně definována jako anorganická nekovová látka s heterogenní polykrystalickou strukturou připravená slinováním. Může se proto jevit v porovnání s monokrystalu jako nedokonalá. U keramiky lze ale využít jevů, které se objevují pouze v polykrystalických materiálech, jak bude na některých příkladech dále ukázáno. Keramika ovlivnila zásadním způsobem rozvoj elektrotechniky. Pro mnohé aplikace v mikrovlákné technice je nepostradatelným materiálem.

## Keramická technologie

Moderní keramické materiály pro elektrotechniku se zpravidla vyrábí ze syntetických surovin, které mají požadované fyzikální a chemické vlastnosti. Cena surovin často exponenciálně roste s jejich chemickou čistotou, a proto je velmi důležitá znalost, které nečistoty a v jakém množství mohou degradovat vlastnosti výsledného výrobku. Prvním technologickým krokem je navážka vstupních surovin. Důležitým parametrem je ztráta žháním, což je procentuální ztráta hmotnosti vzorku suroviny po zahřátí na vysokou teplotu. O ztrátu žháním je nutno navážku korigovat. Navážené suroviny se homogenizují nejčastěji v rotačních nebo vibračních mlýnech. Suroviny zpravidla nereagují s vodou, proto se obvykle homogenizuje mletím ve vodném prostředí. Účelem homogenizace je kromě důkladného promísení vstupních surovin též rozrušení aglomerátů. Navíc dochází k vytvoření krystalových poruch a tím ke zvýšení reaktivity při následném tepelném zpracování. Většinou jsou suroviny dostatečně jemnozrné a postačuje několikahodinová homogenizace. Po odvodnění a podcení následuje tepelný proces zvaný kalcinace, při kterém vzniká požadovaný produkt. Výše kalcinační teploty závisí na fyzikálních a chemických vlastnostech výchozích surovin. Musí být dostatečně vysoká na to, aby došlo k reakci v pevné fázi, ale nesmí dojít k intenzivnímu slinování, což by zhoršilo následné zpracování.



Počáteční stádium slinování

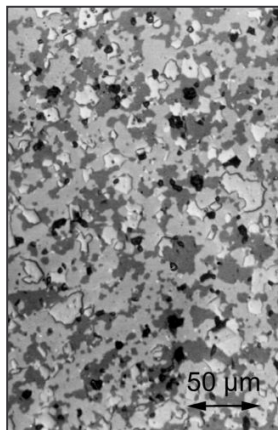
Důležitá je také doba výdrže na kalcinační teplotě, protože mechanismy reakce v pevné fázi jsou relativně pomalé. Hotový kalcinát by již neměl obsahovat nezreagované částice surovin. Následuje intenzivní mletí, jehož výsledkem by měly být částice o velikosti několika mikronů.

Další zpracování závisí na tom, jaká vytvářecí technologie bude použita. Velmi často se používá metody suchého lisování. Při použití automatického lisu se jedná o vysoce produktivní proces, lisovací granulát ale musí být kvalitně připraven nejlépe rozprachovým sušením. Umletá vodní suspenze se přivádí čerpadlem do trysky a rozstříknuté kapénky se suší v proudu horkého vzduchu. Vznikající granule mají velikost několika desetin milimetru a při zahrnutí stěrkou granulát rychle a rovnoměrně zaplní lisovací formu. K dalším vytvářecím metodám patří isostatické lisování, extruze, lití fólií, kalandrování nebo vstříkové lití. Tlusté vrstvy se vytvářejí nejčastěji síťotiskem.

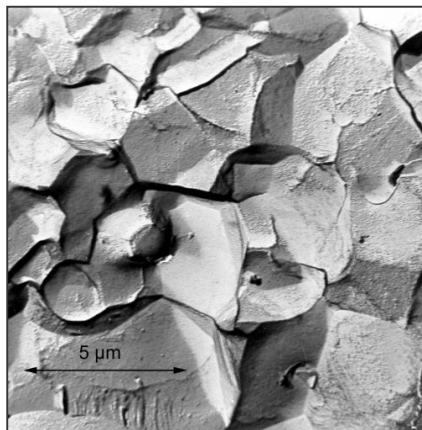
Konečné vlastnosti získává výrobek výpalem, jehož cílem je získání hutné slinuté keramiky. Slinování je fyzikální proces, při kterém dochází k transportu materiálu mezi jednotlivými zrnky, jejich přiblížování a snižování vnitřní porosity za současného smršťování. Hnacím mechanismem slinování je snižování energie povrchu částic transportem hmoty podél povrchu zrn do míst, kde se tato zrna stýkají. Povrch se zmenšuje a z termodynamického hlediska se snižuje celková energie soustavy. Vypálená keramika se pro její tvrdost musí obrábět většinou diamantovými nástroji. Mezi běžné operace patří broušení naplocho rovinnou bruskou, broušení nakulato hrotovou nebo bezhrotou bruskou, lapování, řezání kruhovou pilou s vnitřním břitem a u některých výrobků i leštění. K posledním operacím často patří pokovení. Tlusté vrstvy se vytváří síťotiskem, nástřikem, ponorem, chemickým či galvanickým pokovením. Pro depozici tenkých vrstev, vytvářených např. napařováním, magnetronovým napařováním nebo laserovou depozicí, musí být povrch keramiky leštěn nebo alespoň velmi jemně lapován. Leštít lze pouze některé typy keramiky.

## Metody používané při výzkumu keramických materiálů

U keramických materiálů je nutno charakterizovat jejich mikrostrukturu. Kromě optické mikroskopie se často používá elektronový mikroskop, u kterého je paprsek elektronů rozmítnut a přesně fokusován magnetickým polem. Rozlišení může být až  $10^{-10}$  m, pro studium keramiky ale vzhledem k běžné velikosti krystalů postačuje zvětšení do 10 tisíc. Elektronový



Leštěný nábrus, optický mikroskop



Lom, elektronový mikroskop

mikroskop se doplňuje tzv. mikrosondou, což je systém detektorů, umožňující kvantifikovat energii fotonů, emitovaných dopadem elektronů. V každém bodě dopadu se tak vlastně provádí rychlá chemická analýza a kromě běžného obrazu z elektronového mikroskopu se získají i mapy distribuce jednotlivých prvků. Fázové složení se analyzuje rentgenovou diffrakcí. Monochromatické rentgenové záření se nechá dopadat na zkoumaný vzorek. Na každé rovině atomů dochází k částečnému odrazu a odražené vlny spolu interferují tehdy, pokud se dráhový rozdíl rovná  $n$  násobku vlnové délky. Podle difrakčních linií lze stanovit obsah jednotlivých krystalových fází v celém objemu vzorku.

## Izolační a konstrukční keramika

### Tvrký porcelán a korundový porcelán

Výrobky z těchto materiálů našly uplatnění zejména v elektrorozvodných sítích. Nejdůležitějšími požadavky na izolátory jsou vysoká mechanická a elektrická pevnost, odolnost vůči povětrnostním vlivům, chemická odolnost a samozřejmě cena, protože izolátory tvoří až 10% ceny celé přenosové sítě. Hlavními surovinami pro výrobu elektrotechnického porcelánu je kaolín, živce, oxid křemičitý a oxid hlinitý, který zvyšuje mechanickou pevnost, ale zhoršuje zpracování. Nejvyšší izolátory se vyrábí isostatickým lisováním s následným obráběním. Nezbytnou technologickou operací je glazování. Mechanická pevnost v ohybu dosahuje 150 až 180 MPa u korundového porcelánu, elektrická pevnost je lepší než 30 kV/mm. Dielektrické ztráty jsou vysoké (až  $150 \cdot 10^{-4}$ ), což ale pro průmyslové kmitočty není nijak na závadu. Významnou složkou ceny porcelánových izolátorů je cena energie při výpalu, která se neustále zvyšuje. Proto jsou v současné době porcelánové izolátory nahrazovány výrobky ze skleněných vláken se stříškami z chemicky odolného elastomeru.

### Hořečnatá keramika

Prvními keramickými materiály vyvinutými v moderních laboratořích jsou materiály z trojsložkového systému  $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ . Z hořečnaté keramiky se vyrábí drobné izolační a konstrukční prvky. Pro elektrotechniku jsou nejvýznamnější tři materiály: steatit, forsterit a kordierit, které se navzájem liší obsahem uvedených oxidů.

*Steatit.* Jeho základem je metakřemičitan hořečnatý  $MgO \cdot SiO_2$ . Ve steatitové keramice je velké množství skelné fáze, která obklopuje krystaly a urychluje proces slinování. Jako vstupní suroviny se pro méně náročné použití volí mastek, kaolín a sodnodraselné živce jako tavivo. Steatit má dobrou jak mechanickou pevnost (140 MPa v ohybu), tak i elektrickou pevnost (20 kV/mm). Vysokofrekvenční vlastnosti se značně zlepší náhradou alkalických živců za uhlíkaty alkalických zemin (např.  $BaCO_3$ ,  $CaCO_3$ ). Ztrátový činitel na 1 MHz pak dosahuje hodnoty  $7 \cdot 10^{-4}$  a s frekvencí roste až k hodnotě  $20 \cdot 10^{-4}$  na frekvenci 10 GHz. Steatit se proto v mikrovlnných pásmech běžně nepoužívá.

*Forsterit.* Hlavní složkou je ortokřemičitan hořečnatý  $2MgO \cdot SiO_2$ . Mechanická pevnost forsteritu je nižší než u steatitu, ale má značně nižší dielektrické ztráty (okolo  $5 \cdot 10^{-4}$  na 10 GHz). Jeho teplotní délková roztažnost je vysoká a lze ji poměrem složek a přísad přizpůsobit teplotní roztažnosti některých kovů. Používá se proto ve vakuové technice. Forsterit lze použít v mikrovlnné technice jako konstrukční materiál, ale teplotní závislost permitivity nelze dobře kompenzovat.

*Kordierit* – krystaluje v komplikovaném složení  $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ . Nejdůležitější vlastností kordieritu je velmi nízká délková teplotní roztažnost (až 0,8 ppm / °C při nízkých teplotách) a z toho vyplývající vysoká odolnost vůči rychlým změnám teploty. Teplotní koeficient se dá dobře regulovat přidávkou  $SiO_2$ , který tvoří s kordieritem pevný roztok a teplotní koeficient zvyšuje. Vzhledem k vysokým dielektrickým ztrátám (až  $80 \cdot 10^{-4}$ ) není vhodné kordierit používat ve vysokofrekvenčních obvodech.

### Oxidová keramika

Tímto termínem se označují jednosložkové keramické hmoty složené ze žárovzdorných oxidů buď čistých nebo s příměsími, které neobsahují skelnou složku. Patří sem například  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $MgO$  nebo  $BeO$ .

*Korundová keramika* má ve vysokofrekvenční a mikrovlnné technice široké použití. Elektrické vlastnosti jsou silně závislé na složení a obsahu nečistot. Zejména obsah oxidů alkalických kovů vlastnosti silně zhoršuje. Vzhledem k tomu, že čistý  $Al_2O_3$  slinuje až za velmi vysokých teplot (nad 1750 °C), přidávají se do korundové keramiky pro méně náročné aplikace přísady (Si, Ca, Mg). Ty umožňují snížit slinovací teplotu až pod 1350 °C.

S obsahem oxidu hlinitého klesají ztráty, roste tepelná vodivost, mechanická pevnost a koeficient teplotní délkové roztažnosti. V ČR se vyráběl materiál AK4, pálený ve vodíkové atmosféře na 1900 °C. Jeho mechanická pevnost v ohybu byla 330 MPa. U dielektrického rezonátoru AK4 byla naměřena na 10 GHz hodnota Q okolo 15000. Teplotní závislost korundového rezonátoru je ale příliš vysoká pro praktické použití.

Důležitou aplikací korundu jsou klystrony a magnetrony. Vysoce čistý korund zde dobře splňuje kombinaci požadavků na vysokofrekvenční výkonová zařízení. I za zvýšených teplot si udržuje výborné izolační vlastnosti, elektrickou a mechanickou pevnost, nízké dielektrické ztráty a slušnou tepelnou vodivost. Pokud jsou požadavky na tepelnou vodivost ještě vyšší, například u vysoce výkonových klystronů, používá se oxid berylnatý s vodivostí až desetinásobně vyšší. Vyšší je ale také cena, a to nejen z důvodu dražší suroviny.  $BeO$  se musí zpracovávat ve speciálních podmínkách, protože je toxický. U slinuté keramiky již ale nebezpečí prakticky nehrozí.

Substráty pro tlusté vrstvy se vyrábí litím z materiálu 96%  $Al_2O_3$ . Technologie „doctor blade“ umožňuje vytvářet substráty pro sítotisk přímo, bez nutnosti dalšího opracování po výpalu. Pro depozici tenkých vrstev je nezbytný kvalitní, leštěný povrch substrátu. Takového povrchu je možno dosáhnout u jemnozrnného materiálu s nejméně 98%  $Al_2O_3$ . Při požadavku na vyšší tepelnou vodivost lze použít aluminiumnitrid, který má navíc srovnatelnou teplotní roztažnost s křemíkem.

Korund se používá i pro vícevrstvé laminované substráty technologie MLC. Dnes ale převažuje technologie LTCC na bázi sklokeramiky.

*Oxid zirkoničitý* je vysoce žárovzdorným keramickým materiálem. Výrobky z něho lze použít až do 2400°C [4]. Pro praktické použití je ale nutná jeho stabilizace. Existuje totiž ve třech krystalových modifikacích, a při změně teploty dochází k rekrystalizaci, spojené s velkou objemovou změnou. Pro stabilizaci vysokoteplotní kubické fáze se používají nejčastěji oxidy  $Y_2O_3$ ,  $CaO$  nebo  $MgO$ . Pokud je oxid zirkoničitý stabilizován jen částečně, nachází se v materiálu rozptýlené ostrůvky tetragonální fáze v metastabilním stavu. Při šíření trhliny, dojde k jejich rekrystalizaci, zvětšení objemu a tím k zastavení šíření trhliny. Dalšího zpevnění se dosahuje přidávkou oxidu hlinitého. U keramiky o složení 78%  $ZrO_2$ , 2%  $Y_2O_3$  a 20%  $Al_2O_3$  (ATZ) bylo dosaženo pevnosti v ohybu až 2500 MPa [2].

Při teplotách nad 600 °C se stabilizovaný oxid zirkoničitý chová jako pevný elektrolyt s vodivostí kyslíkovými ionty. Tohoto jevu lze využít k měření obsahu kyslíku v plynech a roztavených kovech, k čištění plynů od kyslíku (argon), v palivových článcích apod.

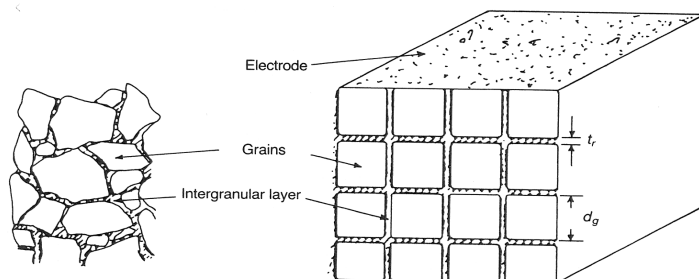
### Vodivá keramika

Mezi vodivou keramiku lze počítat topné články pro odporový ohřev, rezistory s kladnou nebo zápornou teplotní závislostí odporu, rezistory s napěťovou závislostí odporu, iontové vodiče, senzory a supravodiče.

*Silicium karbid* (SiC) je velmi tvrdý materiál. Jeho hlavní použití je v brousící technice. Méně známé jsou jeho elektrické vlastnosti. Čistý SiC je polovodivý a v monokrystalické formě se v devadesátých letech dokonce používal pro modré LED, než byl nahrazen GaN. Dnes se používá např. pro speciální výkonové vř. tranzistory se zvýšenou odolností proti radiaci, pro spínané zdroje nebo UV senzory. Z polykrystalického SiC se vyrábí topné tyče, které jsou použitelné až do teplot 1500°C. Měrný odpor SiC klesá s teplotou, minima dosahuje při 1000°C (zhruba  $10^{-3}$  ohm · m).

*Molybden disilicid* (MoSi<sub>2</sub>) má podobné vlastnosti jako SiC, ale jeho měrný odpor je podstatně nižší. Dá se použít pro topné elementy až do 1800°C, nevýhodou je vysoká cena. Známější je pod obchodní názvem Kanthal-Super.

## Varistory



Skutečná a idealizovaná mikrostruktura varistoru

Hlavní aplikací je ochrana elektronických obvodů. Varistory na bázi ZnO jsou dalším příkladem využití jevů, které se v keramice mohou odehrávat na hranicích zrn. Typické, poměrně komplikované složení keramiky pro varistor je 96,5% ZnO + 0,5% Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 1% CuO + 0,5% MnO<sub>2</sub> + 1% Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 0,5% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Uvedené dotující prvky se koncentrují především v intergranulární fázi mezi zrny ZnO. Mn, Cr a Co jsou prvky, které se mohou vyskytovat v řadě oxidačních stavů a mohou tedy působit jako „pasti“, zachycující elektrony uvolněné v důsledku částečného těkání kyslíku

ze zrn ZnO. Na hranicích zrn se tak vytváří potenciální bariéra. Z makroskopického hlediska dostáváme prvek, který připomíná dvě Zennerovy diody zapojené proti sobě. Mechanismus funkce varistoru není dosud z fyzikálního hlediska dostatečně vysvětlen. Samotný jev „průrazu“ je velmi rychlý (asi 0,5 ns), ale parazitní kapacity a indukčnosti způsobují zpomalení. Kromě ZnO se varistory vyrábí i z SiC. Výroba varistorů vyžaduje značnou zkušenost a je velmi náročná především na tepelné zpracování materiálu. Napětíový rozsah varistoru může být až v řádu kilovoltů. Vyrábějí se i varistory ve tvaru spojky do koaxiální trasy 50 ohm.

## Termistory

Keramických materiálů s vysokou teplotní závislostí odporu je mnoho. Silná teplotní závislost odporu je u keramiky způsobena třemi jevy. Může to být polovodivé chování zrn vedoucí k exponenciální změně odporu. Strukturální transformace spojená se změnou polovodiče na vodič má za následek velkou změnu odporu v úzkém teplotním rozsahu. U některých materiálů dochází v úzkém rozsahu teplot ke změně dielektrických vlastností. Pro NTC se často používají materiály se spinelovou strukturou, jako Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> · MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nebo Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

U PTC rezistorů je prudká změna odporu většinou spojena s Curieho teplotou feroelektrik. Příkladem může být BaTiO<sub>3</sub> dopovaný prvky vzácných zemin. Výrazná změna odporu s teplotou je způsobena změnou elektrické dvojvrstvy na hranicích zrn. PTC efekt závisí na množství hranic zrna v jednotkovém objemu keramiky. U monokrystalů PTC efekt pozorovat nelze.

## Vysokoteplotní supravodiče

Supravodivost je jev, při kterém elektrický odpor poklesne na nulovou hodnotu. Nastává při teplotě nižší, než je teplota kritická. Jev byl objeven již roku 1911 u rtuti při teplotě kapalného helia (4,2 K). Velký nárůst zájmu o supravodivost nastal koncem roku 1986, kdy Bednorz a Muller popsali keramický materiál La-Ba-Cu-O s kritickou teplotou 35 K. Brzy se objevily další sloučeniny jako Y-Ba-Cu-O (93 K), Bi-Sr-Ca-Cu-O (110 K) nebo Hg-Ba-Ca-Cu-O (166 K), pro které stačí chlazení kapalným dusíkem (77 K). Důležitým parametrem je kritická proudová hustota, která je nejvyšší u Y-Ba-Cu-O ( $10^{10}$  A/m), a také kritická velikost vnějšího magnetického pole. Kromě uplatnění supravodičů pro přenos a skladování energie, levitaci a další výkonové aplikace lze vlastností supravodičů využít i v mikroelektronice a mikrovlnné technice. Zajímavou aplikací je Josephsonův přechod, tvořený dvěma supravodiči oddělenými submikronovou dielektrickou bariérou. Přechod ze supravodivého do vodivého stavu je velmi rychlý ( $10^{12}$ ) a lze řídit napětím. Po přivedení stejnosměrného napětí na přechod bude proud oscilovat na frekvenci  $f = 2eU/h$ . Frekvence je závislá pouze na přiloženém napětí a činí přibližně 484 MHz/μV [5]. Supravodiče se též mohou použít pro zvětšení Q u dutinových rezonátorů. Pokud je na stěny dutiny nanášena supravodivá vrstva, Q dramaticky vzroste. Například pro vrstvy Y-Ba-Cu-O byla u 10 GHz dutiny naměřena hodnota Q až 400 tisíc [1].

## Piezokeramika

Keramika sama o sobě nemá piezoelektrické vlastnosti. Pokud bychom rozdrtili piezoelektrický krystal, například monokrystal ZnS, z prášku slinuli destičku a opatřili elektrodami, nedojde u ní působením elektrického pole k žádné deformaci ani se na elektrodách neobjeví náboj, vlivem deformace. Pouze keramika vyrobená z feroelektrického materiálu bude po zpolarizování vykazovat piezoelektrické vlastnosti. Při polarizaci se za zvýšené teploty vlivem stejnosměrného elektrického pole uspořádá doménová struktura do směru jeho působení. Pak na této destičce můžeme i navenek, nejen v jednotlivých doménách, zjistit určitou hodnotu polarizace a tedy i pyroelektrické a piezoelektrické vlastnosti. Dnes se vyrábí převážně keramika na bázi Pb(TiZr)O<sub>3</sub>. Lze ji rozdělit do dvou základních skupin: měkká (soft PZT), která je dotovaná pětimocnými prvky, se používá pro snímače chvění či zrychlení nebo pro akustické aplikace. Je dotovaná například kationty Fe<sup>3+</sup> nebo Ni<sup>3+</sup>. Tvrdá (hard PZT) je vhodná pro výkonové aplikace. Vzhledem k toxicitě olova je snaha ho nahradit, což se v některých aplikacích daří. Používá se zejména KNbO<sub>3</sub> a NaNbO<sub>3</sub>.

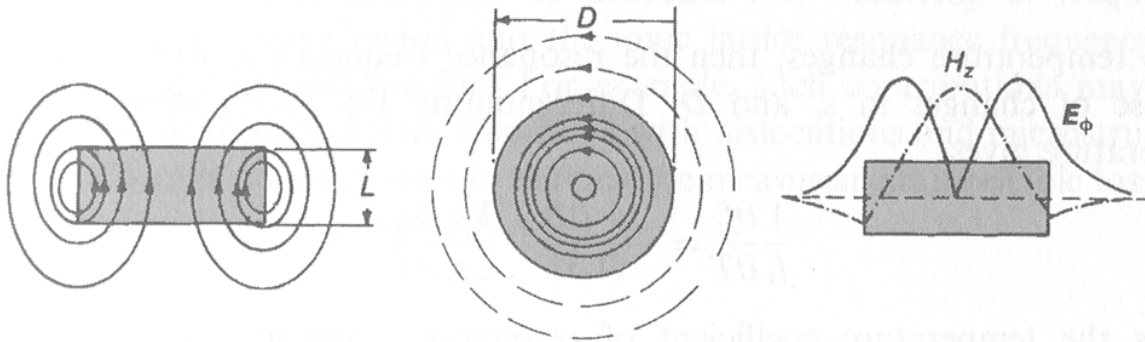
## Keramická dielektrika

Na rozdíl od předchozích kapitol patří k nejdůležitějším parametrům dielektrik permitivita a ztrátový činitel a jejich teplotní, frekvenční, případně napěťové závislosti. Dielektrika se tradičně rozdělují do tří skupin podle permitivity (někdy do skupin čtyř). Dielektrika typu I mají permitivitu do 500, nízké dielektrické ztráty a relativně nízký lineární teplotní koeficient permitivity. Typ II jsou feroelektrika nejčastěji na bázi BaTiO<sub>3</sub> s permitivitou mezi 2 000 až 20 000. Dielektrické ztráty jsou vysoké, řádu od 10<sup>-2</sup> až 3 · 10<sup>-3</sup> a mají i vysoký, většinou nelineární teplotní koeficient permitivity. Obě první skupiny lze použít pro monolitické vícevrstvé kondenzátory. Představitelem typu III je zejména reoxidovaný BaTiO<sub>3</sub>. U kondenzátorů lze speciálním technologickým postupem dosáhnout velmi vysoké zdánlivé permitivity. Pokud se titanititan barnatý vypálí v oxidační atmosféře, vykazuje vysoký měrný odpor řádu 10<sup>8</sup> ohm·m. Při výpalu v redukční atmosféře vzniknou v krystalové mřížce kyslíkové vakance a část titaničitých iontů se zredukuje na titanité. Zredukován BaTiO<sub>3</sub> získá polovodivé vlastnosti a odpor poklesne až o 12 řádů. Řízenou reoxidací lze na povrchu dielektrika vytvořit vrstvu s vysokým odporem, která u kondenzátoru působí jako dielektrikum, přičemž polovodivá oblast keramiky je součástí elektrody. Dosahuje se tak vysokých měrných kapacit, elektrická pevnost je však velmi malá. U bariérových kondenzátorů je část titaničitých iontů substituována ionty s jinou valencí, např. Nb, Sb, La nebo Ce. Ve struktuře pak při výpalu kyslíkové vakance nevzniknou, ale materiál bude polovodivým. Dielektrické vrstvy se vytvoří pomocí mědi, která difunduje po hranicích zrn. Bariérový kondenzátor může mít zdánlivou permitivitu až 500 000.

## Mikrovlnná keramika

Pro použití v RF a mikrovlnné technice jsou na dielektrika kladeny poněkud jiné požadavky. Rozhodující jsou dielektrické ztráty na vysokých kmitočtech a teplotní závislost permitivity. Kromě použití pro kondenzátory malých kapacit jsou hlavní aplikací dielektrické rezonátory, antény, koaxiální rezonátory a filtry. Hlavní složkou mikrovlnných dielektrik tvoří zejména titanáty, zirkonáty, tantaláty nebo niobáty. Často jde o pevné roztoky různých složek, z nichž každá má odlišnou teplotní závislost permitivity.

*Dielektrický rezonátor.* V dielektriku ve tvaru nepokoveného válce se vytvoří stojatá vlna vlivem diskontinuity permitivity na rozhraní dielektrikum-vzduch. Vlnová délka stojaté vlny je oproti vzduchovému dutinovému rezonátoru zkrácena v poměru odmocniny permitivity dielektrika. Využívá se vidu TE<sub>01δ</sub>. Se změnou teploty dochází vlivem délkové teplotní roztažnosti keramiky ke zvětšení rozměrů a tím ke snížení rezonanční frekvence.



Vhodnou volbou poměru jednotlivých složek dielektrika a změnou technologie lze připravit materiál tak, aby teplotní závislost permitivity kompenzovala rozměrové změny a rezonanční frekvence při změně teploty zůstala konstantní. Lze tak dokonce kompenzovat i teplotní závislosti dalších prvků mikrovlnného obvodu včetně např. ladicích prvků. Ideálním stavem by měla být nulová teplotní závislost obvodu v celém pracovním rozsahu teplot. Proto je důležité u keramických hmot sledovat i derivace teplotních závislostí. Teplotní závislost rezonanční frekvence dielektrického rezonátoru TC<sub>f</sub> lze přesně měřit a používá se pro charakterizaci mikrovlnných dielektrik. Používanou jednotkou je ppm/°C, v některé literatuře M/K, což je totéž. 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 důležitá charakteristika materiálu, dielektrické ztráty, se opět odvozuje od dielektrického rezonátoru. Rezonátor se umístí do stíněné dutiny vhodné velikosti. (obrázek) Rozměry dutiny musí být takové, aby její vlastní rezonance byla dostatečně vzdálena od frekvence rezonátoru. Z rezonanční křivky je možno vypočítat nezátěžený činitel kvality, Q<sub>0</sub> či Q<sub>U</sub>. Vzhledem k tomu, že u většiny mikrovlnných dielektrik je Q<sub>U</sub> v určitém rozsahu frekvencí nepřímo úměrná frekvenci, používá se též parametru Q·f s jednotkou THz.

*Koaxiální rezonátor.* (obrázek) Zvětšení permitivity dielektrika koaxiálního vedení má za následek zmenšení délky koaxiálního rezonátoru. Keramické koaxiální rezonátory se vyrábí buď s kruhovým nebo se čtvercovým průřezem, což je pro montáž výhodnější. Nejčastější jsou čtvercové, ale používají se i půlvlnné. Výsledný činitel jakosti je dielektrickými ztrátami kvalitní keramiky ovlivněn méně, důležitější jsou vodivostní ztráty ve vnitřním vodiči a kvalita zkratu. Povrch keramiky musí být dostatečně kvalitní, aby se u pokovení dosáhlo co nejvyšší vodivosti na rozhraní keramika-kov. Používá se zejména stříbro, které se vypaluje. Pro méně náročnější použití je vhodná i měď. Q<sub>U</sub> závisí také na průřezu rezonátoru a na frekvenci, kde ovšem díky zmenšující se hloubce vniku ztráty klesají. U průřezu 6x6 mm se na frekvenci 1 GHz dosahuje hodnoty Q<sub>U</sub> okolo 600. Keramické koaxiální rezonátory se používají do oscilátorů a jsou důležitým prvkem keramických filtrů. Filtry typu pásmová propust se často vyrábějí z keramických vícerezonátorových bloků, kde se vazby ladí vhodným přizpůsobením pole mezi jednotlivými středními vodiči rezonátorů.

*LTCC pro mikrovlnnou techniku.* Rozvoj technologie monolitických vícevrstevných bloků zasáhl i do mikrovlnné techniky. Na nevypálené keramické fólie se nanášejí planární struktury, fólie se pak laminují páli jako bloky. V současné době se pro tuto sklokeramickou technologii používají materiálové systémy Ba-Nd-Ti-O ale i Mg(Ca)TiO<sub>3</sub> a dosahované parametry jsou překvapivě dobré.

### Některé materiály pro mikrovlnné aplikace

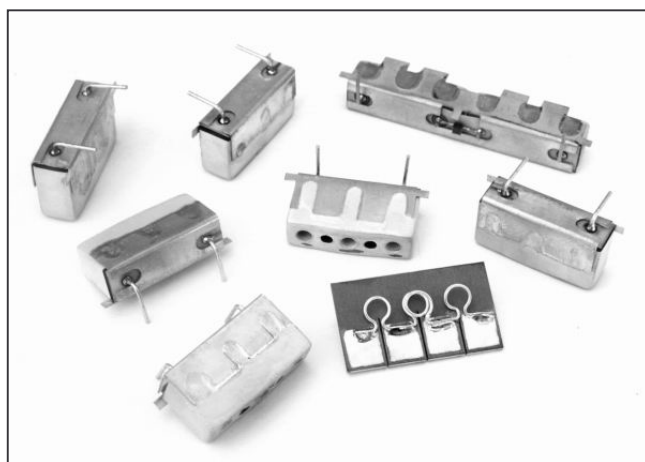
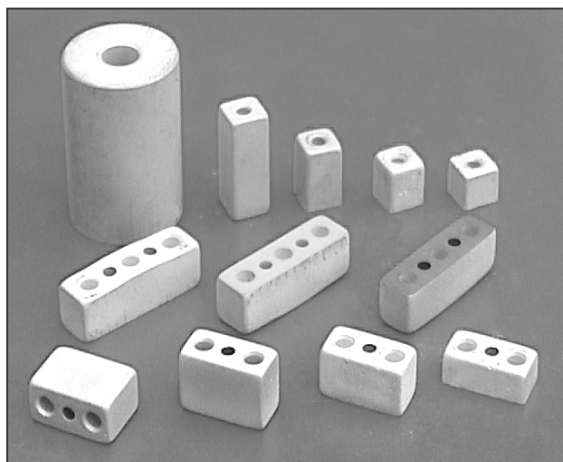
$MgTiO_3$  je dobře známým mikrovlnným dielektrikem. Samotný má záporný  $TC_r$ . Substitucí Ca za Mg lze dosáhnout nulové teplotní závislosti, ovšem v nepříliš širokém rozsahu teplot. Permittivita kompenzovaného materiálu je 20,5 a  $Q_U$  se na 10 GHz pohybuje okolo 7000. Dá se použít pro dielektrické rezonátory i nad 20 GHz, ale hlavní použití je pro koaxiální rezonátory, filtry a tlustovrstvé substráty.

$Zr(Sn)TiO_4$  patří stále k nejrozšířenějším mikrovlnným keramikám; označují se jako ZTS. Podobně jako předchozí materiál je i tento tuhým roztokem, u kterého se poměrem Zr/Sn ovlivňuje teplotní chod. Problémem je jeho špatná slinovatelnost, proto se musí dotovat oxidy přechodných kovů tak, aby se vytvořilo malé množství kapalné fáze, umožňující slinutí do hutného stavu. Složení použitých přísad výrazně ovlivňuje barvu. Vhodnou volbou složení a technologie zpracování lze teplotní chod regulovat velmi dobře. V rozsahu  $-6\text{ppm}/^\circ\text{C}$  až  $+12\text{ppm}/^\circ\text{C}$  lze vyrábět s reprodukovatelností asi  $1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ . Permittivita se pohybuje okolo 37 a  $Q_U$  na 10 GHz může dosahovat 6000. Používá se jak pro dielektrické tak pro koaxiální rezonátory a filtry.

Hexagonální perovskity mají základní složení  $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ , kde Mg může být nahrazen Zn. Známější jsou pod označením BMT a BZT. Jejich hlavní výhodou je vysoká hodnota  $Q_U$ , která běžně bývá 2x vyšší než u předchozích dvou materiálů. Předpokladem je použití vysoce čistých surovin, jejichž cena, zejména u oxidu tantaličného, brání masovějšímu použití. Tantal se podařilo částečně nahradit levnějším niobem, ale za cenu zhoršení parametrů. Podle složení se permittivita pohybuje od 25 do 35. Používají se především pro dielektrické rezonátory s nejvyššími nároky.

$Ba(Pb)Nd_2Ti_4O_{12}$  se vyznačuje vysokou permittivitou při vyhovujících ztrátách. Podle složení může být permittivita od 70 do 90 nebo i více. Činitel kvality  $Q_U$  je více než 5x nižší než u ZTS, ale tato nevýhoda je vyvážena právě vyšší permittivitou a tím i miniaturizací. Hlavní použití je pro koaxiální rezonátory, filtry a v technologii LTCC.

Materiály s napěťovou závislostí permittivity. V poslední době probíhá intenzivní vývoj mikrovlnných dielektrik, které vykazují napěťovou závislost permittivity. Jejich použití umožňuje řídit stejnosměrným napětím frekvence rezonátorů či přeladovat úzkopásmové filtry, antény apod. Materiál na bázi  $Ba(Sr)TiO_3$  (BST), který tuto vlastnost vykazuje, není sám o sobě vhodný jako rezonátor pro mikrovlnná pásma z důvodu vysokých ztrát, a to ani po částečném zlepšení vlastností dotováním MgO. Pokud se BST keramika použije ve formě tlusté vrstvy jako ladicí prvek kvalitního dielektrického rezonátoru, lze dosáhnout zatím přeladitelnosti pouze jednotek MHz na 10 GHz při velikosti pole 2kV/mm. Ve vývoji jsou další materiály, jako např.  $BaTi(Ga,Nb)O_3$ , který má nižší dielektrické ztráty. Přeladitelnosti větší než 5% bylo dosaženo u materiálu  $Ag(Ta,Nb)O_3$  (ATN), ale dielektrické ztráty na 10 GHz byly okolo 0,1. Nejvyšší přeladitelnosti se dosahuje na tenkých vrstvách, například u vrstvy BST naprášené na monokrystalu MgO bylo dosaženo přeladitelnosti až 30% při intenzitě pole 15 kV/mm, teplotní závislost permittivity ale činila desítky % v pracovním rozsahu teplot [6]. Jako zajímavá možnost se nabízí doladování dielektrického rezonátoru pomocí bimorfního piezokeramického prvku, který se po přiložení stejnosměrného pole ohýbá a tím se mění rozložení pole v okolí dielektrického rezonátoru. Touto metodou bylo dosaženo přeladitelnosti 40 MHz na frekvenci 2 GHz. [6]



Ukázky výrobků z mikrovlnné keramiky: koaxiální rezonátory, multirezonátorové bloky a filtry

### Literatura:

- [1] Moulson, A.; Herbert, J.: Electroceramics, Wiley, 2003
- [2] Hanykýř, V.; Kutzendörfer, J.: Technologie keramiky, SiliS, 2000
- [3] Pospíšil, Z.; Koller, A.: Jemná keramika, SNTL, 1981
- [4] Hlaváč, J.: Technologie silikátů, SNTL, 1988
- [5] Kittel, Ch.: Úvod do fyziky pevných látek, Academia, 1985
- [6] Sborník z konference MMA, York, 2003