

고 주 파 유 전 체 재 료



1. 서 론

다가오는 21 세기 지식, 정보 화 사회에서는 인간이 접하게 되는 정보의 종류가 다양해지며 그 양도 매우 방대해지고 있다. 이와 같은 다양한 정보를 효과적으로 전달하고 이용하기 위하여서는 정보의 저장과 전달기능을 효율적으로 수행할 수 있는 디바이스의 개발이 필요하다.

정보의 전달기능 측면에서 고려하면, 통신 정보량의 비약적인 증대가 예상되며, 이러한 수요를 충족시킬 수 있는 통신수단으로써 고주파(microwave) 및 mm 파대역 광역 통신 시스템이 연구 개발되고 있다. 고주파에서의 통신과 방송기기 및 인공위성을 이용하기 위한 SHF 방송 수신기와 개인 이동 통신기기의 개발이 활발하게 진행되고, 고주파 반도체 소자의 집적화로(MIC) 기술이 현저히 진보됨에 따라 그 회로 소자의 소형화, 고성능화, 저가격화가 요구되고 있다.

이와 같은 요구에 부응하여 현재 LNA (Low Noise Amplifier), PAM(Power Amplifier Module), Mixer 등과 같은 고주파 능동소자(active component)는 MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuits)화 되어 소형화가 용이하지만, 필터(filter)와 발진기(osillator) 등과 같은 수동소자(passive component)는 소형화가 어렵다. 고주파 수동소자로서 지금까지 사용했던 온도

에 안정된 구리 합금인 Invar공동 공진기 (cavity resonator)는 300 MHz 부터 1 GHz 까지의 주파수 범위에서 사용 가능하지만 그 크기가 크고, 무거워서 소형화하기에는 불가능하며 최근 SAW(surface acoustic wave) 필터나 Helical 필터 등의 개발로 소형화가 부분적으로 가능하게 되었지만 사용가능한 주파수가 낮고 동작과워 (power handling capability) 가 작기 때문에 아직 실용화에는 문제점이 있다.

그러므로 고주파 수동소자의 크기를 작게하고, 동작과워도 크며, 온도에 안정된 주파수 특성을 갖게하기 위해서는 유전상수가 크며, 유전손실이 작고, 온도 변화에 따른 그 특성변화가 작은 유전체 재료가 필요하나, 산화물 이외의 유전상수가 큰 재료의 유전분산 (dielectric dispersion) 은 대부분 마이크로파 이하 대역에서 일어나므로, 마이크로파 대역에서 사용할 수 있는 유전상수가 큰 재료는 산화물 유전체 재료에 국한된다.

따라서, 고주파 (microwave) 대역에서 유전체 세라믹스가 고주파 기기에 사용하게 된것은 유전 특성과 온도 특성이 우수한 재료가 개발됨으로써 유전체 공진기를 이용한 발진기와 필터가 소형화 되었고, 그 결과 고주파 기기의 소형화, 고성능화가 가능하게 되었기 때문이다.

고주파 기기중 우리주변에서 쉽게 접할 수 있으며, 그 수요가



김 응 수
경기대학교 재료공학과 부교수



이 형 규
전자부품종합기술연구소
선임연구원



윤 기 현
연세대학교 세라믹공학과 교수

빠른 속도로 증가하고 있는 개인 이동 통신기기는 900 MHz 아날로그 방식의 AMPS, NMT, TACS 등을 제 1 세대로 시작하여, 900 MHz 디지털 방식의 D-AMPS, GSM, PDC 등의 제 2 세대 거쳐, 현재는 제1, 2 세대의 취약점인 개인 이동통신의 양과 질을 보완하기 위하여 1.8-1.9 GHz 디지털 방식의 PCN, PHP, PCS 등을 이용하고 있는 제 2.5 세대라고 할 수 있으나, 궁극적으로 지금보다 더욱 넓은 지역에서 이용 가능한 개인 이동 통신기기의 개발이 필요하며 이를 위해서는 제 3 세대라고 할 수 있는 2.2 GHz 이상의 주파수와 디지털 방식을 이용한 FPLMTC (future public land mobile telecommunication system), UMTS (universal mobile telecommunication system)에 대한 연구가 요망되어 전 세계적으로 활발한 연구와 개발이 진행되고 있고, 이에 사용할 수 있는 고주파용 유전체 세라믹스는 더욱 우수한 고주파 유전특성이 요구되고 있으므로, 고주파 유전체 재료의 개발이 21 세기 지식, 정보화 사회로의 진입을 빠르게 하고, 그 질을 향상시킬 수 있는 원천 핵심 요소 기술개발이라고 해도 과언이 아닐 것이다.

그러므로, 본고에서는 대표적인 고주파 유전체 재료의 특징을 고찰하고 향후 기술 개발동향에 대하여 논하고자 한다.

2. 고주파 유전체 재료의 조건

고주파 유전 재료의 중요한 응용은 유전체 공진기를 이용한 발진기와 필터이며, 그 성능은 사용되는 유전체 재료의 특성에 의하여 결정되므로 고주파 유전체 재료에는 매우 엄격한 조건

이 요구된다.

가장 간단한 유전체 공진기는 유전상수 k 인 세라믹스가 사용된다. 유전상수 k 가 일정값 이상으로 커지게 되면 전자기파 (electro-magnetic wave) 가 유전체 세라믹스와 공기와의 계면에서 반사되어 유전체 내부에 정상파 (standing wave) 를 형성하여 공진되고 공진주파수 (resonant frequency)를 갖게 된다. 이때 전기장과 자기장의 분포를 그림 1(a)자기장, (b)자기장, (c) 전기, 자기장 변화에 나타내었다.

정상파의 파장 λ_d 는 유전체 세라믹스의 직경 D 와 거의 같게 된다($\lambda_d \approx D$). 자유공간 (free space)에서의 공진주파수는 $f_0 = c/\lambda_0$ (c : 진공중의 광속, λ_0 : 파장)로 표시할 수 있으며 유전체 내부에서는 고주파의 파장 (λ_d)이 유전상수 (k)에 반비례($\lambda_d = \lambda_0/\sqrt{k}$)하여 작아지게 되므로 유전체 공진기의 공진 주파수는 식

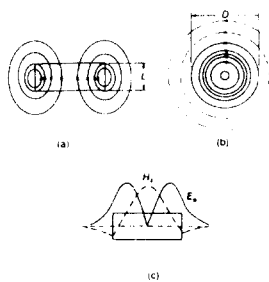


그림 1. 공진 유전체의 장의분포
Fig. 1. Fields in a microwave resonance dielectrics

(1)로 표시할 수 있다.

$$f_0 = c / (\lambda_d \sqrt{k}) \\ \approx c / (D \sqrt{k}) \dots (1)$$

따라서 동일한 공진 주파수를 갖는 유전체 공진기의 크기는

$1/\sqrt{k}$ 비례하므로 고주파부품을 소형화하기 위해서는 유전상수는 큰 값을 가져야 한다.

또한 온도가 변화되면 유전상수와 유전체 세라믹스의 크기가 변화되고, 공진주파수는 유전상수와 유전체의 크기의 함수이므로 공진주파수도 변화된다. 식 (1)을 온도 변화에 대한식으로 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\left(-\frac{1}{f_0}\right) \cdot \left(\frac{\partial f_0}{\partial T}\right) \\ = -\left(\frac{1}{D}\right) \cdot \left(\frac{\partial D}{\partial T}\right) \\ - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(-\frac{1}{k}\right) \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial T}\right) \dots (2)$$

여기서,

$$\left(-\frac{1}{f_0}\right) \cdot \left(\frac{\partial f_0}{\partial T}\right) : \text{공진 주파수의 온도계수(TCF)}$$

$$\left(\frac{1}{D}\right) \cdot \left(\frac{\partial D}{\partial T}\right) : \text{선팽창계수}(\alpha_i)$$

$$\left(\frac{1}{k}\right) \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial T}\right) : \text{유전상수의 온도계수(TCK)}$$

즉, 식 (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$\text{TCF} = -\left(\alpha_i + \frac{1}{2} \cdot \text{TCK}\right) (3)$$

일반적으로 세라믹스의 선팽창계수는 10 ppm/°C 정도이므로 유전상수의 온도계수 (TCK)는 -20 ppm/°C 이어야 온도변화에 따라 공진주파수는 변하지 않게 된다. 그러므로 공진주파수의 온도계수(TCF)가 O(zero)에 근접할 수 있도록 TCK와 α_i 의 적절한 조절이 필요하다. 공진주파수가 온도에 안정한 경우에만 온도에 안정된 고주파 유전체 부품을 제작할 수 있기 때문에 응용에 있어서는 중요한 요구조건이 된다.

고주파회로에서 유전체 공진기가 커플링(coupling) 되었을 때 주

파수에 대한 응답특성은 그림 2와 같으며 그림에서 $f_0/\Delta f$ 는 Q_0 (selectivity)로 정의되며, 주파수특성이 안정하여 잡음이 없는 발진기(oscillator)나 삽입손실(insertion loss)이 작고, 선택도(selectivity)가 우수한 협대역 필터(narrow band filter)에서 요구되는 조건은 Q_0 값이 커야한다.

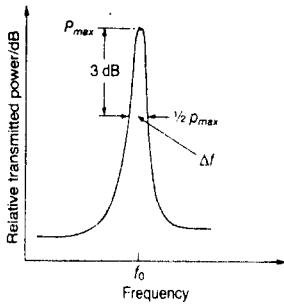


그림 2 고주파 공진기의 주파수 응답 특성

Fig. 2 Frequency response of a microwave resonator

유전체 공진기의 손실($1/Q_0$)은 식 (4)와 같이 유전체의 유전손실 ($\tan \delta = 1/Q_0$), 도체손실($1/Q_c$)과 방사손실($1/Q_r$) 합으로 표시할 수 있으므로 높은 Q_0 값을 갖는 유전체 공진기 계를 얻기 위해서는 사용되는 유전체 세라믹스의 유전손실이 작아야 한다.

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_r} \quad (4)$$

그러므로 고주파 유전체 재료에 요구되는 조건은 첫째, 회로소자를 소형화하기 위하여 높은 유전상수를 가져야하며, 둘째, 회로소자의 공진 주파수가 온도에 안정되기 위하여 공진주파수의 온도계수가 작아야하며, 셋째, 주파수특성이 안정되고 선택도가

우수하기 위해서는 유전손실이 작아야한다.

3. 고주파 유전체 재료의 종류와 특성

유전체 재료를 고주파에 응용하려는 시도는 1939년 Richtmyer¹에 의해 처음 시도되었으며, 1960년대에 Okaya², Cohn³ 등이 TiO_2 를 이용하여, 소형이면서 유전손실이 작은 유전체 공진기와 필터를 제작하여 그 가능성이 제시되었으나 공진주파수의 온도계수 ($TCF = 450 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)가 너무 커서 실제 응용에는 곤란하였다. 이와같은 공진주파수의 온도계수를 향상하고, 앞절에서 기술한 고주파 유전체 재료에 필요한 요구조건을 만족시키며, 그 특성을 향상하기 위한 연구가 1970년대 부터 연구가 활발하여, $BaO-TiO_2$ 계, $BaO-Re_2O_3-TiO_2$ ($Re: Nd, Sm, La$)계, $(Mg, Ca)TiO_3$ 계, $(Zr, Sn)TiO_4$ 계, $(CaSrBa)ZrO_3$ 계, 복합페로브스카이트 (complex perovskite) 화합물계의 단일화합물과 고용체의 우수한 고주파 유전체 세라믹스가 개발되었고, 최근에는 개인 이동 통신 부품의 소형화, 경량화를 위하여 유전상수가 80 이상인 고 유전율 세라믹스에 대한 연구와 칩적층 유전체 필터용 900°C 이하 저온 소결 유전체 재료의 연구도 활발히 진행되고 있으며, 또한 고주파 기기의 사용 주파수가 높아짐에 따라 유전상수의 향상 보다는 무부하 Q 값 ($\approx 1/\tan \delta$)을 증가시키려는 연구도 활발히 진행되고 있다. 지금까지 보고되고 있는 대표적인 고주파 유전체 재료의 종류와 특성은 다음과 같다.

1) $BaO-TiO_2$ 계

$BaO-TiO_2$ 계의 상태도인 그림 3에서와 같이 온도와 조성에 따라 여러 가지 상이 존재하며, 이들의 고주파 유전특성은 조성과 소결온도 등에 의하여 결정된다. 본 계의 여러 가지 상중 고주파 유전체 재료로써 이용되는 것은 $BaTi_4O_9$ 과 $Ba_2Ti_9O_{20}$ 로써, 각각 유전율은 37, 40, Q 값은

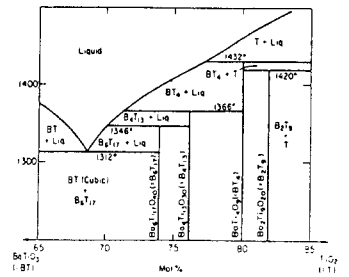


그림 3. $BaO-TiO_2$ 계의 상태도
Fig. 3. Phase diagram of $BaO-TiO_2$ system

4GHz에서 9000, 6000 이고, 온도 안정성은 $Ba_2Ti_9O_{20}$ 이 ($TCF = 2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) $BaTi_4O_9$ ($TCF = 15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 보다 우수하다⁴. 그러나 일반적인 세라믹스 제조공정으로는 제거하기 힘든 제 2 상의 형성으로 단일상의 $BaTi_4O_9$, $Ba_2Ti_9O_{20}$ 을 얻기가 용이하지 못하다. 그러므로 하소 분말을 산(acid) 처리하여 제2상을 용출⁵ 제거하거나, SnO_2 , 나 ZrO_2 를 미량 첨가함으로써 단일상의 $Ba_2Ti_9O_{20}$ 를 제조⁶할 수 있었으며, MnO 와 WO_3 를 첨가하여 온도안정성과 Q 값을 조절하였고⁷, 최근 0.03~0.3 mol%의 $BaSnO_3$ 를 첨가⁸하여 $BaCO_3$ 와 TiO_2 의 반응성을 증가시켜, 단일상의 $Ba_2Ti_9O_{20}$ 를 형성시키고 고주파 유전특성을 향상시키었다.

2) BaO-R₂O₃-TiO₂ 계

본계는 BaO-TiO₂ 계 중 TiO₂ 함유량이 많은 영역에 희토류 화합물(Nd₂O₃, Sm₂O₃, La₂O₃)를 첨가한 계로써 대표적인 화합물은 BaO·R₂O₃·5TiO₂ 와 BaO·R₂O₃·4TiO₂ (R:Nd, Sm, La)이지만 본계에서는 단일상에 대한 여러 가지 다른 견해가 있고

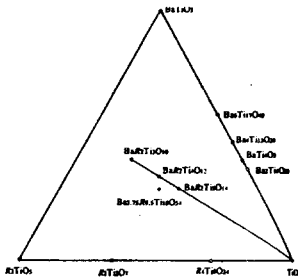


그림 4. BaTiO₃-R₂TiO₅-TiO₂ 계의 화합물
Fig. 4. Compounds in the BaTiO₃-R₂TiO₅-TiO₂ system

일반적인 산화물 혼합법으로는 단일상의 제조가 어렵고, 그림 4의 여러상이 혼합상으로 존재하여 조성에 따라 여러상의 혼합효과에 의해 고주파 유전특성이 조절된다.

BaO-Nd₂O₃-TiO₂ 계는 1 MHz에서 유전상수는 70~90, 유전손실(tan δ)는 5x10⁻⁴ 정도이지만 유전상수의 온도계수(TCC)가 -100 ppm/°C 로서 비교적 크다.

그러므로 온도 안정성을 향상하기 위하여 BaO 대신에 Bi₂O₃나 PbO를 일부 치환하여 4 GHz에서 유전상수는 60~90, Q값은 1100~2000, 공진주파수의 온도계수(TCF)가 거의 0(zero)에 근접하는 우수한 재료가 보고⁹되었다.

BaO-Sm₂O₃-TiO₂ 계는 3 GHz에서 유전상수는 75~95, Q값은

2000, TCF는 -17~20 ppm/°C를 나타낸다. 또한 공진 주파수의 온도계수를 향상하기 위하여 BaO대신 SrO를 일부 치환한 (Ba,Sr)O-Sm₂O₃-TiO₂ 계는 소결후 TiO₂, Ba₂Ti₉O₂₀, BaO·Sm₂O₃·5TiO₂ 상이 존재하며 세상이 상호 보완하여 3 GHz에서 유전상수는 70~90, Q값은 3700, TCF는 0(zero)를 갖는다¹⁰.

BaO-La₂O₃-TiO₂ 계는 앞의 두계에 비하여 유전상수 (100~110)는 비교적 높으나 Q값(500~700)이 크게 감소하고 TCF (500 ppm/°C)가 크게 증가하였다¹¹. 또한 BaO-(Sm,La)₂O₃-TiO₂, BaO-(Nd,Sm)₂O₃-TiO₂, BaO-(Nd,La)₂O₃-TiO₂, BaO-(Pr,Nd)₂O₃-TiO₂ 계와 본계의 유전손실을 향상하기 위하여 R₂O₃-TiO₂ (R:La,Nd,Sm)계에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 첨가제 및 제조 공정 변화에 의한 고주파 유전특성의 향상이 기대되어지는 계이다.

3) ZrO₂-SnO₂-TiO₂ 계

ZrTiO₄는 정전용량의 온도계수(TCC)가 작은 온도 보상용 콘덴서 재료이었으나 SnO₂가 첨가됨에 따라 고주파 유전특성이 우수한 것이 입증되어 많은 연구 개발이 이루어졌다.

그림 5는 이계의 조성변화에 대한 고주파 유전특성 (7 GHz)을 나타낸 것이다. 그중 Zr_{0.8}Sn_{0.2}TiO₄는 우수한 고주파 유전특성¹²(k=36~37, Q=6000, TCF=0)을 나타내고 있으며 Q값은 출발물질(TiO₂(anatase), 순도, 첨가제(NiO, MnO₂, Fe₂O₃, Nb₂O₅, Ta₂O₅, Sb₂O₅)^{12,13}, 제조공정¹⁴에 의해 증진된다고 보고되고 있다.

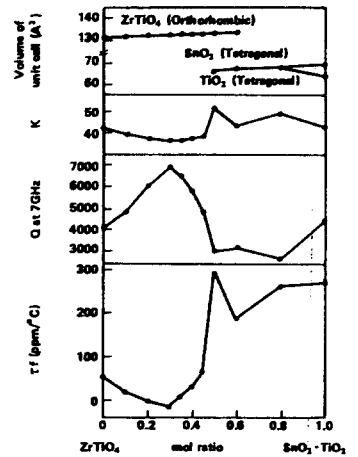


그림 5. ZrO₂-SnO₂-TiO₂ 계의 고주파 유전특성
Fig. 5. Microwave properties of ZrO₂-SnO₂-TiO₂ system

4) 복합 페롭스카이트 계

일반식 A(B_{1/3}B'_{2/3})O₃ (A=Ba, Sr, B=Mg, Zn, Mn, Ni, Ca, Co, B'=Nb, Ta)으로 표현되는 본계의 본계의 복합 페롭스카이트

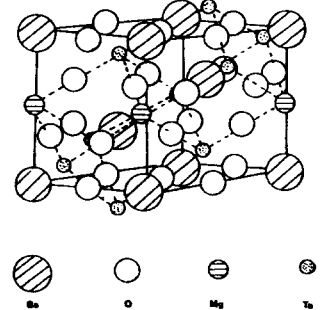


그림 6. Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃ 결정 구조
Fig. 6. Crystal structure of Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃

구조는 그림 6과 같이 단순 입방정(cubic) 페롭스카이트 구조에서 B 격자 이온인 B, B' 이온이

1:2로 규칙화(ordering)됨에 따라 그림 7 과 같이 x-선 회절 분석의 피크 분리로 확인할 수 있는 초격자(superstructure)를 형성하여 육방정(hexagonal)형태의 규칙적인 의사입방정(pseudocubic) 구조를 갖는다고 보고되고 있으며 B 격자이온의 이온반경차가 클수록, 전하차가 클수록 B 격자이온의 규칙화는 더욱 증진되고, 격자 비틀림 (lattice distortion) 현상의 증진으로 높은 Q 값을 나타낸다고 알려져 있고¹⁵, 또한 B 격자 이온의 규칙화와 격자 비틀림 현상의 고주파 유전손실 감소에 대한 기여도에 관한 연구에 의하면 격자비틀림 현상보다는 B격자 이온의 규칙화에 의하여 고주파 유전손실은 더욱 감소된다고 보고되고 있다¹⁶.

저손실 고주파 유전체 재료인 복합 페로 스키이트 화합물중 우수한 고주파 유전특성을 나타내는 $Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ ($k=30$, $Q=15000(12GHz)$, $TCF=0$ ppm/°C) 와 $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ ($k=25$, $Q=$

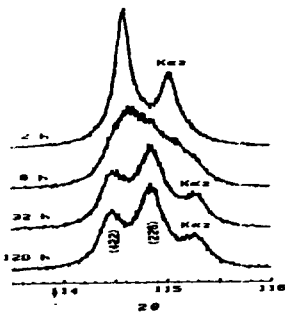


그림 7. 소결시간 변화에 따른 $Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ 의 XRD 피크 분리

Fig. 7. XRD peak splitting of $Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ as a function of sintering time

16800 (10.5 GHz), $TCF=4.4$ ppm/°C) 의 고주파 유전특성을 향상하고자 ZrO_2 ,¹⁷ SnO_2 ¹⁸를 첨가하여 유전손실을 크게 감소하였으며, 소결온도가 1650°C로 높은 $Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O_3$ 에 $BaWO_4$ 를 첨가하여 1450°C에서도 우수한 고주파 특성 ($k=24$, $Q=13000$ (10.5 GHz), $TCF=0$)을 보고¹⁹ 하였다. 복합 페로 스키이트 화합물계의 저손실의 원인이 되는 격자 진동에 관한 연구와 첨가제, 제조공정의 지속적인 연구로 FPLMTS 와 UMTS 에 필요한 저손실의 우수한 고주파 유전체 재료의 개발이 기대 되어진다.

5) Zirconate 계

본계는 앞의 TiO_2 계에 비하여 많은 연구는 이루어지지 않았으나, $(CaSrBa)ZrO_2$ 계²⁰ 와 $(PbMe)ZrO_2$ 계²¹ ($Me=Ba, Sr, Ca$) 에 대한 연구가 진행되고 있다. 그림 8은 $(CaSrBa)ZrO_2$ 계의 각 조성

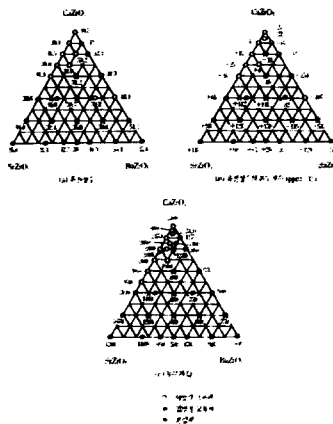


그림 8. $(CaSrBa)ZrO_2$ 계의 고주파 유전 특성

Fig. 8. Microwave properties of $(CaSrBa)ZrO_2$ system

을 나타낸 것이며 그림에서 알

수 있듯이 사방정(orthorombic) 구조를 갖는 Ca-Sr 함량이 많은 영역이 우수한 고주파 유전특성을 ($k=29\sim32$, $Q=2000\sim3000$ (11GHz), $TCF=-5\sim-50$ ppm/°C) 나타내고 있다. 또한 사방정구조에서 Zr의 일부를 Ti로 치환한 경우에 고주파 유전특성이 향상된다고 보고 되었다.

$(PbMe)ZrO_2$ 계에서 $Me=Ba, Sr$ 인 경우에는 고주파 유전특성이 우수하지 못하나, $Me=Ca$ 인 경우에는 Ca치환량 변화에 따라 우수한 고주파 유전특성 ($k=100\sim118$, $Q=1000\sim1150$ (3GHz), $TCF=0\sim30$ ppm/°C) 이 보고되고 있다.

4. 향후 기술 개발 방향

위에서 기술한 고주파 유전체 재료외에도 $CaO-TiO_2-SiO_2$ 계, $MgTiO_3-CaTiO_3$ 계, $SrTiO_3-CaTiO_3-MnTiO_3$ 계 등이 연구되고 있으며, 이와 같은 고주파 유전체 재료의 개발은 최근 10년 사이에 현저한 진보가 있었으며 사용주파수나 용도에 따라 최적의 재료를 선택할 수 있다. 그러나 고주파 능동소자가 MMIC화가 이루어지고 있으므로 수동소자는 표면 실장화 (surface mount device)되어야 하고, 현재의 고주파 수동소자가 표면실장화 되기 위해서는 그 크기 및 특성의 소형화, 슬림화가 요구되기 때문에 고주파 유전체 재료의 특성 향상을 위한 지속적인 연구기술 개발이 필요하다. 최근 이와같은 연구의 일환으로 고주파 유전체와 전극물질인 Ag, Cu 등과 동시 소결을 위한 저온소결 첨가제나, 저온소결이 가능하면서 우수한 고주파 특성을 나타내는 고주파 유전체 재료의 연구가 활발히 진행되고 있다.

끝으로, 이와같은 연구개발을 통하여 고주파 유전재료가 그 응용범위를 확장할 수 있기를 기대한다.

5. 참고 문헌

1. R.D.Richtmyer, "Dielectric Resonator," J. Appl. Phys., 10[1] 391 (1939)
2. A.Okaya, "The Rutile Microwave Resonators," Proc. IRE, 48:1921 (1960)
3. S.B.Chon, "Microwave Band pass Filters Containing High-Q Dielectric Resonators," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-16 [4] 218 (1968)
4. H.M.O'Bryan, Jr., J.Thomson, and J.K.Plourde, "A New BaO-TiO₂ Compound with Temperature-Stable High Permittivity and Low Microwave Loss," J. Am. Ceram. Soc., 57 [10] 450 (1974)
5. H.M.O'Bryan, Jr., J.Thomson, and J.K.Plourde, "Effects of Chemical Treatment on Loss Quality of Microwave Dielectric Ceramics," Ber. Dt. Keram.Ges., 55[7] 348 (1978)
6. J.M.Wu and H.W.Wang, "Factors Affecting the Formation of Ba₂Ti₉O₂₀," J. Am. Ceram. Soc., 71[10] 869 (1988)
7. S.Nomura, K.Tomaya, and K.Kaneta, "Effect of Mn Doping on the Dielectric Properties of Ba₂Ti₉O₂₀ Ceramics at Microwave Frequency," Jpn. J. Appl. Phys., 22 [7] 1125 (1983)
8. K.H. Yoon, J.B. Kim, W.S. Kim and E.S. Kim, "Effect of BaSnO₃ on the Microwave Dielectric Properties of Ba₂Ti₉O₂₀," J. Mater. Res., 11[8] 1996 (1996)
9. W.S. Kim, K.H. Yoon, E.S. Kim and K.H. Joe, "Effect of WO₃ on Microwave Dielectric Properties of BaO-Nd₂O₃-4TiO₂ System", J. Kor. Phys. Soc. 32 [2] 374 (1998)
10. J. M. Wu and M. C. Chang, "Reaction Sequence and Effects of Calcination and Sintering on Microwave Properties of (Ba,Sr)-Sm₂O₃-TiO₂ Ceramics," J. Am. Ceram. Soc., 73 [6] 1599 (1990)
11. K.C.J.Raju, V.Sivasubramanian, R.Pragasam, B.Viswanathan, V.R.K.Murthy, "Contributions to the dielectric constant of the system Ba_{1-n}2Ti₄O₁₂ from packing fraction and nephelauxetic ratio," J. Appl. Phys., 74 [3] 1968 (1993)
12. K.Wakino, K.Minai, and H. Tamura, "Microwave Characteristics of (Zr,Sn)/TiO₄ and BaO-PbO-Nd₂O₃-TiO₂ Dielectric Resonators," J. Am. Ceram. Soc., 67[4] 278 (1984)
13. K.H. Yoon, Y.S. Kim and E. S. Kim, "Microwave Dielectric Properties of (Zr_{0.8}Sn_{0.2})TiO₄ Ceramics with Pentavalent Additives," J. Mater. Res., 10[8] 2085 (1995)
14. S.Hirano, T.Hayashi, and A. Hattori, "Chemical Processing and Microwave Characteristics of (Zr,Sn)TiO₄ Microwave Dielectrics," J. Am. Ceram. Soc., 74[6] 1320 (1991)
15. S.B. Desu, and H.M. O' Bryan, "Microwave Loss Quality of BaZn_{1/3}Ta_{2/3}O₃ Ceramics," J. Am. Ceram. Soc., 68 [10] 546 (1985)
16. E.S. Kim and K.H. Yoon, "Effect of Nickel on Microwave Dielectric Properties of Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃", J. Mater. Sci., 29, 830 (1994)
17. K.Wakino, M.Murata, and H.Tamura, "Far Infrared Reflection Spectra of Ba(Zn Ta)O₃-BaZrO₃ Dielectric Resonator Material," J. Am. Ceram. Soc., 69[1] 34 (1986)
18. H.Matsumoto, H.Tamura and K.Wakino, "Ba(Mg,Ta)O₃-BaSnO₃ High-Q Dielectric Resonator," Jap. J. Appl. Phys., 30[9B] 2347 (1991)
19. K.H. Yoon, D.P. Kim and E.S. Kim, "Effect of BaWO₄ on the Microwave Dielectric Properties of Ba(Mg_{1/3}Ta_{2/3})O₃", J. Am. Ceram. Soc., 77[4] 1062 (1994)
20. T.Yamaguchi, Y.Komatsu, T.Otobe, and Y.Murakami, "Newly Developed Ternary (Ca,Sr,Ba) Zirconate Ceramic System for Microwave Resonators," Ferroelectrics, 27, 273 (1980)
21. J.Kato, H.Kagata and K. Nishimoto, "Dielectric Properties of Lead Alkaline-Earth Zirconate at Microwave Frequencies," Jap. J. Appl. Phys., 30[9B] 2243 (1991)

< 전 재일 위원 >