

# 저손실 고주파 유전재료 개발 동향

글 \_ 한찬수, 이준석, 조연화, 최익진, 조용수  
연세대학교 신소재공학과

## 1. 서론

최근 무선통신기술의 발전으로 단순한 음성 송수신 위주의 통신서비스에서 부터 동영상방송, 화상전화, 파일 전송과 같은 다양한 멀티미디어 응용 서비스까지로 확대되고 있다. 이러한 다양한 무선통신 서비스의 시작 이면에는 사용주파수 대역의 다중 밴드화와 기가헤르쯔 이상의 고주파 대역 이용화라는 점에서 더 나아가, 광대역이 가능한 60GHz, 77GHz 또는 94GHz 대역까지로의 광범위한 사용이 검토되고 있다.

최근 들어 이러한 초고주파대역을 “mm파”라고 지칭하고 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 mm파 주파수 대역 사용의 장점은 오래전부터 인식되어 왔지만, 고가

의 구현기술 문제로 군사용이나 특수 무선 송수신용으로만 전개 되어왔다. 그 주된 이유로는 새로운 산업 application 활성화의 부족과 관련 MMIC 기술 개발의 미진, 그리고 기존의 금속가공을 통한 bulky한 제품과 고가의 제작비용이 문제로 대두 되어 왔다.

그러나 최근에 이러한 문제점을 해소하고, mm파 응용의 보급 확대를 통한 새로운 시장 창출을 위하여 선진 기업들을 중심으로 제품의 소형화와 함께 저가격화의 장점을 지닌 waveguide를 대체하는 SiP (System In Package) 형태의 세라믹 패키지 기술 응용 개발뿐 아니라, 새로운 저온 소성 유전체 기판 재료에 대한 연구를 활발히 진행하고 있어서 이러한 응용 시장이 빠른 속도로 창출될 것으로 기대하고 있다. Fig. 1은 다양한 고주파대역의 응용

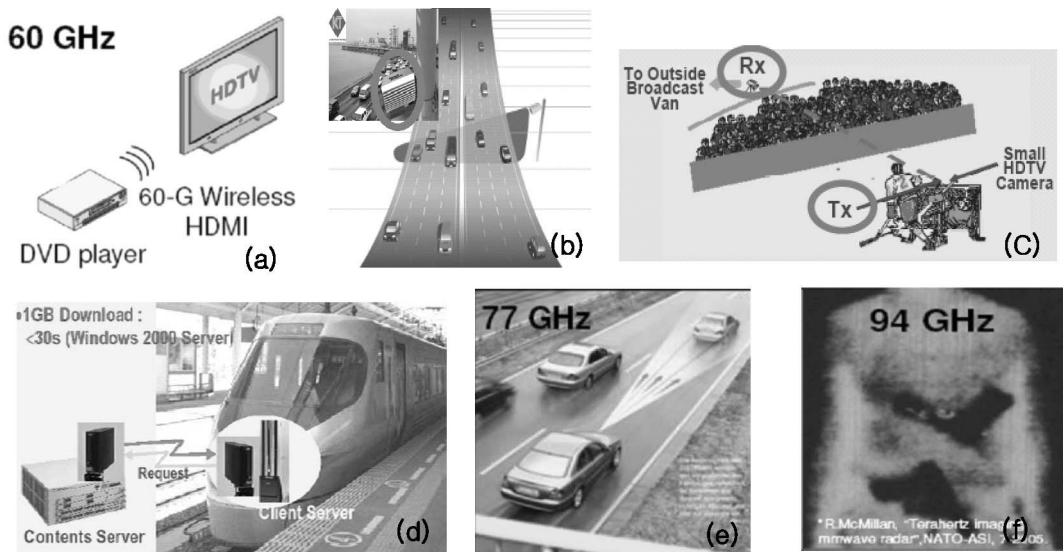


Fig. 1. 다양한 고주파영역대의 응용기술.

기술 동향을 나타낸 그림이고, Fig. 2는 mm파 관련 기판 물량 및 시장 예측을 나타낸 그림이다. 이를 보면 향후 mm파 관련한 시장의 지속적인 성장 가능성을 파악 할 수 있다.

현재와 같은 시장 초기에 맞추어 mm파 응용을 위한 SiP 세라믹 패키지 기술 개발 및 관련 소재 원천 기술력 확보는, 기존의 포화 상태와 치열한 경쟁이 진행되는 수

기가 주파수 대역의 세라믹 패키징 관련 국내 업계의 새로운 전기를 마련할 것이다.

mm파 대역의 주파수를 이용한 SiP 모듈을 진행 중인 회사로는 LTCC 기술의 선두회사인 DuPont/Heraeus/Kyocera 등을 들 수 있다. Passive embedding 기술 중 가장 효과적이라고 인정받고 있는 LTCC 기술의 다양한 solution을 최초로 공급한 선두적인 위치에 있는 DuPont사의 경우 초정밀 패턴 구현이 가능한 무수축 소성 원천 기술과 고용량 내장 소자를 위한 고유전율 이중 재료기술을 보유하고 있으며, 독일의 IMST, MSE와 핀란드의 VTT는 24GHz 대역의 LMDS용 고집적 모듈 뿐 아니라 77GHz 대역의 자동차용 radar 센서 개발 등 LTCC 기술을 이용한 mm파 대역 응용 기술을 확보 하고 있으며, 독일의 Heraeus와 같은 소재 원천기술을 보유한 기업들도 무수축공정을 이용한 초고주파대역에서 요구되는 재료 개발을 진행 중이다. 일본의 Kyocera는 high TCE (Temperature Coefficient of Expansion) LTCC 기술을 통하여, 세라믹 모듈과 PCB board 사이의 solder joint 신뢰성을 개선하여, Intel의 Wimax RF FEM 공급 업체로 선정된바 있으며, 일본의 NEC는 초저손실 특성을 갖는

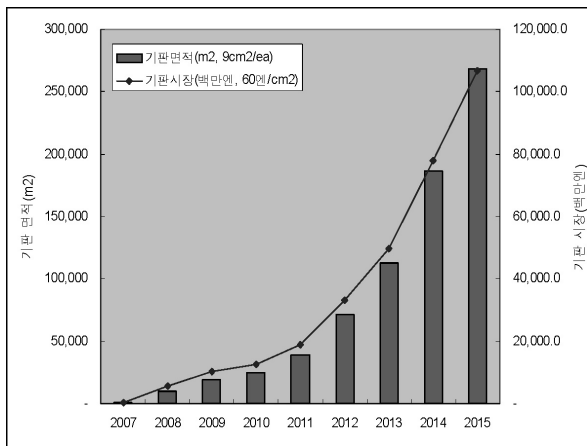


Fig. 2. mm파 관련 기판 물량 및 시장 예측(Yano Report).

<p>IMST(독일)의 LMDS(24GHz) Transceiver 모듈</p>	<p>MSE(독일)의 27~30GHz Transceiver 모듈</p>	<p>NEC(일본)의 60GHz 대역 wireless -HD transceiver</p>
<p>Sharp(일본)의 60GHz 대역 wireless -HD transceiver</p>	<p>NTT (일본)의 60GHz 대역 wireless -HD transceiver</p>	<p>Hitachi(일본)의 77GHz Car radar transceiver 모듈</p>

Fig. 3. 외국 선진기업들의 초고주파 모듈.

LTCC 조성을 이용하여 60GHz 대역의 1Gbps digital data streaming이 가능한 wireless-HD용 transceiver 개발을 최근 발표하기도 하였다. Fig. 3은 외국 선진기업들의 초고주파 모듈의 내용들을 나타낸 그림이다.

이에 반하여 국내 고집적 모듈용 LTCC 기술은 현재 삼성전기와 LG이노텍과 같은 대기업과 필코CND, 아모텍, 이노칩테크놀로지, 삼영전자공업, 광성전자, 아이엠텍, 알엔투 등의 중소 업체들이 주축이 되어 RF 부품 및 모듈 사업을 전개하고 있다. 그러나 해외 선진기업의 로드맵에 따른 고집적화와 모듈화에 catch-up 방식의 기술 개발과 국내의 원재료 업계의 영세성으로 인한 재료 공급 면에서 안정적이지 못한 문제를 동시에 가지고 있다. 이러한 상황에서 국내 기업들이 RF 부품 및 고집적 모듈의 초고주파수 회로 설계 및 초저손실 재료의 연구 개발은 다소 어려운 상황이 현실이지만, 새로운 응용 시장으로 진입할 수 있다는 사실을 통해 재료, 공정, 회로설계 등의 다양한 부문에서 연구가 진행되고 있다.

연구 방향은 크게 3가지로 유리 기반 저온 동시소성 세라믹(LTCC)과 초저손실 벌크 유전체 그리고 이의 재료를 응용한 저온 공정 박막 유전체로 나누어져 있으며 지금부터 각 연구 영역에 대해 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 초고주파용 유리 기반 LTCC 소재 연구

휴대용 소형 전자기기 사용이 증가함에 따라 고집적화된 초고주파용 수동소자의 개발이 요구 되었다. 고집적도를 이루기 위해 다층(multilayer) 기술이 적용되어 기판내부에 capacitor, resistor, inductor 등의 수동소자를 내장하여 고집적화, 경박단소화, 고신뢰성을 이룰 수 있게 되었다. 수동소자의 구동을 위하여 전기 전도도가 높고 저가인 은, 구리의 전극 물질을 사용하는데 이 물질들의 녹는점은 900°C 이하이다. 따라서 기판재료로써 저온 소결이 가능한 저온 동시소성 세라믹(LTCC)이 주목 받게 되었다.

저온에서 세라믹 소재의 소결이 가능하기 위하여 유리 기반의 소재가 사용되게 되었다. 초고주파용 LTCC 소재의 경우 저손실 특성이 특히 요구되나 유리의 첨가로 인

해 유전 특성 향상이 제한되므로 낮은 유전상수 값과 높은 Q 값을 가지는 새로운 유리의 개발이 필요하게 되었다. 유리 기반의 LTCC 소재의 경우 900°C 이하에서 치밀화가 가능해야 하고 10 이하의 유전 상수 값과 800 이상의 Q 값, 그리고 공진주파수의 온도 의존 계수(TCF)가 0 ppm/°C 이어야 한다. 일반적으로 상용화된 LTCC용 유리 소재는 모토로라에서 개발한 anorthite, Ferro사에서 개발한 calcium borosilicates, DuPont에서 개발한 lead borosilicates가 있다. 상용화된 소재를 제외하고 활발히 연구되고 있는 물질에는 희토류 원소가 첨가된 borate 유리가 있다. 이들의 유전상수와 Q 값의 범위는 Fig. 4에서 나타내고 있다.

우수한 유전성질을 가지는 새로운 유리로 lanthanum borate ( $\text{La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ ) 유리가 보고되었으며 Chkraborty 그룹에서 20-28 mol%  $\text{La}_2\text{O}_3$  첨가로 안정적인 이성분계의 유리 제조가 가능하다고 보고 하였다.<sup>1)</sup> 이 가운데서 26 mol%  $\text{La}_2\text{O}_3$ 와 74 mol%  $\text{B}_2\text{O}_3$  이루어진 유리와 30 wt% 알루미늄이 혼합된 재료의 경우 8.4의 유전상수 값과 15.8 GHz에서 785의 Q 값을 보이며 lead-free 유리 기반 LTCC 소재로의 응용 가능성이 확인되었다.<sup>2)</sup>

낮은 소결온도에서 더 향상된 유전특성을 얻기 위하여 alkali 원소가 첨가된 20RO-20 $\text{La}_2\text{O}_3$ -60 $\text{B}_2\text{O}_3$  (R=Ca, Mg, Zn) 유리를 제조하여 특성을 연구하였다. 40 wt% 알루미늄

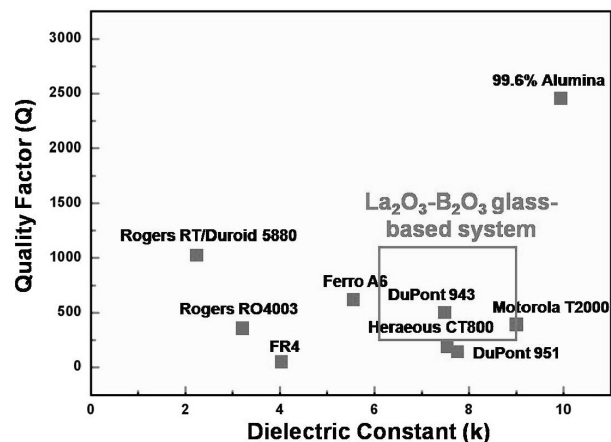


Fig. 4. 상용화 물질과  $\text{La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$  유리 기반 물질의 유전특성.

미나가 혼합되어 850°C에서 소결되었을 때 Zn가 첨가된 유리의 경우 낮은 온도에서 치밀화 과정이 진행되며 결정화 과정에 Zn가 관여하면서 ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 상을 형성하여 8.3의 유전상수 값과 1,091의 Q 값의 우수한 유전특성을 나타내었다. 게다가 Mg 또는 Zn가 첨가된 유리기반의 세라믹 소재의 경우 우수한 내산성특성을 지니고 있어 상용화 가능성이 향상되었다. Table 1에 각각의 alkali 원소가 첨가되었을 때 물리적 성질과 유전성질을 나타내었다.<sup>3,4)</sup>

Table 1. 20RO-20La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-60B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R=Ca, Mg, Zn) 유리를 이용한 저온 유전체 특성

Alkali Element	Density (g/cm <sup>3</sup> )	x-y shrinkage (%)	Resonance frequency (GHz)	Dielectric constant (k)	Quality factor (Q)	Qxf
Ca	3.20	11.8	17.4	7.6	290	5,038
Mg	3.54	15.7	16.1	8.1	471	7,606
Zn	3.89	16.5	17.0	8.3	1,091	18,597

우수한 유전특성과 내산성을 나타낸 20ZnO-20La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-60B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 유리에서의 희토류 원소의 영향을 살피기 위해 ZnO-R'<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R'=La, Nd, Sm & Gd) 유리를 제조하여 연구하였다. 이 가운데 Gd 이 첨가된 유리의 경우 40 wt% 알루미나와 혼합하여 850°C에서 소결하였을 경우 8.1의 유전상수 값과 312의 Q 값을 보이며 상용화된 LTCC 물질로의 응용 가능성을 나타내었다.<sup>5)</sup> 그리고 La와 Nd의 경우 Zn와의 상대적인 비를 변화하여 그 특성을 연구하였는데 15ZnO-25Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-60B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 유리 50 wt% 알루미나를 혼합한 세라믹 소재가 6.5의 유전상수 값과

1,194의 Q값을 가지며 가장 우수한 유전특성을 보였다. 15ZnO-25Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-60B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 유리 기반 소재의 경우 TCF 값이 매우 큰 음의 값을 가지고 있었기 때문에 TiO<sub>2</sub>의 첨가를 통해 TCF 값을 0 ppm/°C로 만들 수 있었다.<sup>6)</sup> 다양한 비로 연구된 borates 유리 기반의 세라믹 소재의 조성은 Fig. 5에서 나타내고 있다.

고주파용 유리 기반의 LTCC 소재로는 lanthanum borates 기반의 소재 외에도 alkali 원소가 첨가된 borosilicate 유리 기반의 소재와 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub> 조성의 anorthite 유리 기반 소재도 고주파에서의 유전 성질과 함께 세라믹 filler의 영향 또는 전극 물질과의 반응성과 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 본지에서는 희토류 원소가 첨가된 lead-free borates 유리 기반의 LTCC 소재 연구 동향과 유전성질에 대해 다루었다. 850°C의 낮은 소결온도에서의 우수한 유전성질과 내산성 그리고 RoHS 규정에 부합하는 조성은 고주파용 LTCC 소재로 상용화되기 위한 충분한 잠재력을 보여주었다.

### 3. 조적손실 유전체 소재 연구

최근 휴대폰, 무선랜 그리고 지능형 교통 시스템(ITS ; intelligent transport systems) 등과 같은 이동 통신 분야에 널리 적용될 수 있는 마이크로파(microwave)와 밀리미터파(millimeterwave) 대역의 유전체 재료 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 밀리미터파 대역의 통신분야는 많은 정보를 빠른 속도로 전송할 수 있는 특성을 발

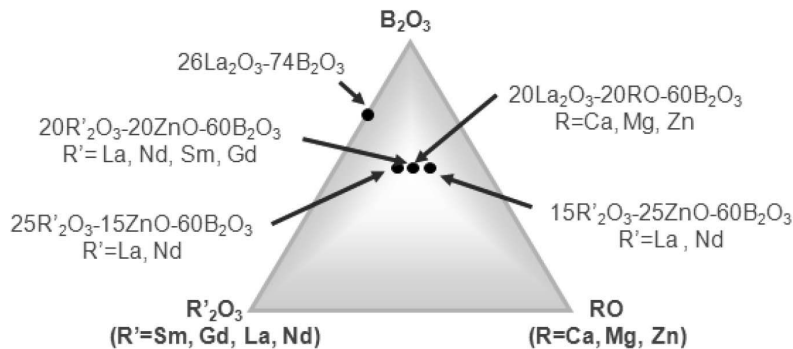


Fig. 5. 희토류 원소와 alkali 원소가 첨가된 borates 유리 조성.

현하기 위하여 높은 품질계수( $Q \times f$ ,  $Q$ : quality factor), 낮은 유전상수( $\epsilon_r$ : dielectric constant), 그리고 공진주파수에서 낮은 온도계수( $\tau_f$ : thermal coefficient in resonant frequency)를 요구한다. 특히 품질계수는 회로의 전자기파로 인한 분극의 변화에 따라 발생하는 유전손실( $\tan\delta$ : dielectric loss)의 역수에 해당하며 주파수에 따른 높은 품질계수는 회로의 높은 선택도(selectivity)를 얻게 하는 중요 인자가 된다. 공진주파수에서 거의 0에 가까운 온도계수는 소자의 열적 안정성을 높여준다. 현재까지 위에 나열한 특성들을 갖는 새로운 마이크로파와 밀리미터파 대역의 초저손실 저유전율 세라믹 재료로서 silicate계 forsterite( $Mg_2SiO_4$ ), willemite( $Zn_2SiO_4$ ), corundum 구조를 갖는 alumina,  $Mg_4(Nb_{2-x}Ta_x)O_9$ , 그리고  $Y_2Ba(Cu_{1/4}Zn_{3/4})O_5$  세라믹스 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

$MgO$ 와  $SiO_2$  파우더를 혼합하여 고상반응법으로 합성한 forsterite( $Mg_2SiO_4$ ) 세라믹스의 경우, 270,000 GHz의 품질계수와 6.8의 유전상수 및 공진주파수에서의  $-67\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 의 온도계수를 얻을 수 있다고 보고되었다.<sup>7)</sup> 이는 유리를 포함하는 일반적인 상용 forsterite에 비하여 월등한 값을 보이는 것이며 Fig. 6에서 보이는 것처럼 유리의 첨가로 인해 계면에서의 불순물로 인한 분극 손실 및 glassy phase에 의한 유전 손실 발생에서 기인한다. 고순도 미세 분말을 이용한 경우 유리를 사용하지 않아도 96~98%의 이론 밀도를 갖는 단일 forsterite 상을 합성하

였으며 입자 성장을 통한 local dipole moments를 감소시킬 수 있으므로 유전 손실이 크게 감소하는 것으로 알려져 있다. Willemite( $Zn_2SiO_4$ ) 세라믹스는 forsterite와 같이 고순도 ZnO 분말을 사용하여 고순도의 willemite를 합성하는 것이 가능하며 219,000 GHz의 높은 품질계수와 6.6의 유전상수를 갖는다. 소결온도는  $1340^\circ\text{C}$ 으로 forsterite보다 상대적으로 낮으며  $-61\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 의 온도계수를 갖는 것으로 보고되었다.<sup>7)</sup> Alumina의 경우 일반적으로 소결온도가 증가함에 따라  $1350^\circ\text{C}$ 에서 400,000 GHz로부터  $1650^\circ\text{C}$ 에서 최대 680,000 GHz의 품질계수를 가지며 Fig. 7에서와 같이 alumina 형성 시 단일 상 유무, 치밀도 및 입자 성장에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 최근에는 Ogawa-Kan group에 의해 347,000 GHz의 우수한 품질계수와 12의 유전상수,  $-65\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 의 온도계수를 갖는  $Mg_4(Nb_{2-x}Ta_x)O_9$  세라믹스가 보고된 바 있다.<sup>8)</sup>(Fig.8)

공진 주파수에서의 온도계수를 거의  $0\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 에 가깝게 하기 위하여 위에서 기술한 forsterite, willemite 그리고 alumina 세라믹스에 공진주파수에서  $+450\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 의 온도계수를 갖는 rutile( $TiO_2$ )를 첨가하는 연구도 진행되고 있으며, forsterite에 24wt% rutile을 첨가하여  $1200^\circ\text{C}$ 에서 소결한 경우 공진주파수에서의 온도계수를  $0\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 으로 만들 수 있으며 85000 GHz의 품질계수 및 11의

Table 2. 초저손실 저유전 마이크로파 유전체

소재	Dielectric constant( $k$ )	$\tau_f$ [ppm/ $^\circ\text{C}$ ]	$Q \times f$
forsterite( $Mg_2SiO_4$ )	6.8	-70	270,000
willemite( $Zn_2SiO_4$ )	6.6	-61	219,000
alumina	11	-65	680,000
$Mg_4(Nb_{2-x}Ta_x)O_9$	12	-65	347,000

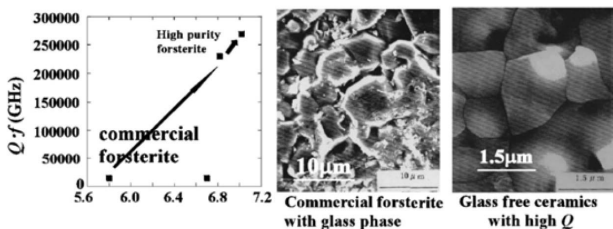


Fig. 6. 상용 및 고순도 파우더로 제조한 forsterite 세라믹스. (Ref. 7)

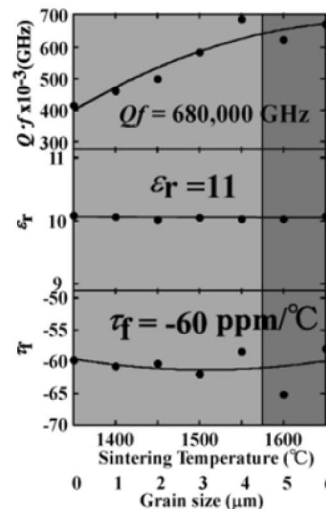


Fig. 7. 소결 온도에 따른 alumina 세라믹스의 유전 특성. (Ref. 7)

유전상수 값이 보고된 바 있다.<sup>9)</sup> 마찬가지로 willemite의 경우도 12wt%의 rutile 첨가 시 0ppm/°C을 얻을 수 있고 넓은 소결 온도에서 안정한 공진주파수에서의 온도계수를 나타내었다.<sup>10)</sup> Alumina의 경우에도 rutile의 첨가를 통한 온도계수의 향상이 가능하나 1300°C 이상의 소결 온도에서 alumina와 rutile이 반응하여 음의 온도계수를 갖는 aluminum-titanate(Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>)을 생성한다. 최근 annealing을 통하여 Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> decomposition을 유도하여 공진주파수에서의 온도계수가 0ppm/°C, 주파수에 따른 품질계수가 170000GHz 그리고 12.4의 유전상수 값을 얻어 재료의 성질을 향상시킨 연구가 보고된 바 있다.<sup>11)</sup>(Fig.9)

#### 4. 저온 공정 저손실 유전 박막 연구

초경량, 초소형, 저가형 부품 혹은 시스템 개발이라는 모바일 및 유비쿼터스 시대의 시장의 요구사항을 충족시킬 수 있는 차세대 패키징 공정 기술은 SiP 기술이라 하겠다. 최근 다양한 SiP 기술 중 가장 주목을 받고 있는 3D SiP 기술은 여러 칩을 수직으로 적층을 하여 단위 면적당 실장 면적을 극대화한다. 이러한 3D SiP 기술에 적용될 수 있는 mm파 대역의 저손실 유전체 소자들은 기존 벌크(bulk) 타입이 아닌 후막형(thick film) 더 나아가 박막형(thin film) 소자로의 변화가 요구되어진다.

저손실 유전체 박막을 증착시키는 방법으로는 물리증착법(PVD; physical vapor deposition), 화학증착법(CVD; chemical vapor deposition) 그리고 sol-gel 법을 통한 spin-

coating 등이 있다. 이러한 박막 증착 공정들이 3D SiP 기술에 적용되기 위해서는 다른 소자들이나 금속 배선에 열적 피해를 주지 않기 위해 저온공정이라는 제한 조건이 따르게 되며, 저온 공정은 공정의 간결화를 통해 저가 격화라는 시장의 요구사항 또한 만족시킬 수 있다.

새로운 박막형 유전체 연구로서 무소성 기판에 적용할 저온 공정 초저손실 유전체 재료들 중에 forsterite를 선정하여 PVD 증착법 중의 하나인 RF magnetron sputtering에 의한 박막 증착 공정 최적화 및 금속 배선과의 연계성 등을 통하여 다층으로서의 응용 가능성에 관한 연구를 진행하고 있다.

RF magnetron sputtering 공정을 제어하는 base pressure, gas ratio, RF power 등과 같은 변수 중 working pressure를 조절하고 저온 공정을 위해 실온에서 증착하였다. Working pressure가 증가함에 따라 낮은 증착률을 얻을

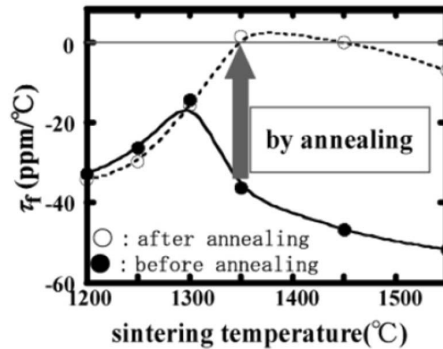


Fig. 9. Alumina에 rutile첨가에 따른 온도계수의 변화 및 annealing의 영향 (Ref. 11).

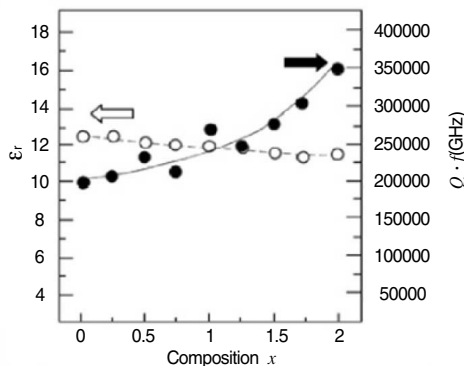


Fig. 8. Mg<sub>4</sub>(Nb<sub>2-x</sub>Tax)O<sub>9</sub> 세라믹스의 유전 특성 (Ref.8).

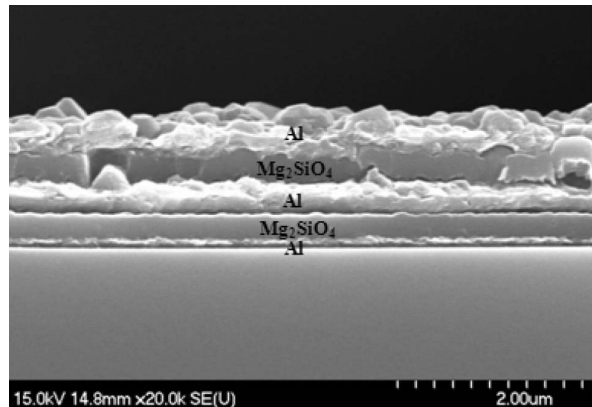


Fig. 10. 30mTorr에서 적층한 forsterite 박막.

수 있었고, grain size는 작아지는 것을 알 수 있었다. 20mTorr와 30mTorr에서 증착된 forsterite의 경우 기존 행하여진 실험들에서 나타난 유전상수 6~7의 값과 0.03의 이하의 낮은 유전손실값을 얻을 수 있었다. 가장 좋은 유전 성질을 갖는 30mTorr의 증착조건을 이용하여 다층으로서의 응용성을 타진한 결과 Fig. 10에서와 같이 유전 박막 2층을 적층할 수 있었다. 이 연구를 통해 기관의 고성능화 및 소형화에 비약적인 성장을 기대할 수 있으리라 본다.

## 감사의 글

본 기술 보고서는 지식 경제부 소재원천기술개발사업 및 부품소재기술개발사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. I. N. Chakraborty, J. E. Shelby, and R. A. Condrate Sr., "Properties and Structure of Lanthanum Borate Glasses," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68** [7] 368-71 (1985).
2. Y. J. Seo, D. J. Shin, and Y. S. Cho, "Phase Evolution and Microwave Dielectric Properties of Lanthanum Borate-Based Low-Temperature Co-Fired Ceramics Materials," *J. Am. Ceram. Soc.*, **89** [7] 2352-55 (2006).
3. Y. H. Jo, M. S. Kang, K. W. Chung, and Y.S. Cho, "Chemical Stability and Dielectric Properties of RO-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R=Ca, Mg, Zn)-Based Ceramics," *Mater. Res. Bull.*, **43** [2] 361-69 (2008).
- 4 Y. H. Jo, D. H. Yeon and Y. S. Cho, "New Lanthanum Borates-Based Low Temperature Dielectrics," pp.74-76, Proceedings of the 3rd Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT), Denver, April, 2007.
5. Y. H. Jo, D. H. Yeon, B. C. Mohanty, and Y. S. Cho,

- "Gadolinium Zinc Borate-Based Low Temperature Dielectrics," *Metals and Materials International*, **14** [4] 493-96 (2008).
6. D. H. Yeon, Y. H. Jo, V. S. Saji, D. H. Kang, and Y.S. Cho, "Crystallization Behavior and Microwave Dielectric Characteristics of ZnO-(La, Nd)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Based Dielectrics," *J. Electroceram.* (in press).
  7. H. Ohsato, T. Tsunooka, Y. Ohishi, Y. Miyauchi, M. Ando, and K. Kakimoto, "Millimeter-wave Dielectric Ceramics of Alumina and Forsterite with High Quality Factor and Low Dielectric Constant," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** 350-53 (2003).
  8. H. Ogawa, Kan, S. Ishihara, and Y. Higashida, "Crystal Structure of Corundum Type Mg<sub>4</sub>(Nb<sub>2-x</sub>Ta<sub>x</sub>)O<sub>9</sub> Microwave Dielectric Ceramics with Low Dielectric Loss," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** [14] 2485-88 (2003).
  9. Tsunooka, T., Andou, M., Higahida, Y., Sugiura, H. and Ohsato, H., "Effects of TiO<sub>2</sub> on Sinterability and Dielectric Properties of High-Q Forsterite Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** 2573-78 (2003).
  10. Y. Guo, H. Ohsato, and K. Kakimoto, "Characterization and Dielectric Behavior of Willemite and TiO<sub>2</sub>-doped Willemite Ceramics at Millimeter-Wave Frequency," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **26** 1827-30 (2006).
  11. Y. Ohishi, Y. Miyauchi, H. Ohsato, and K. Kakimoto, "Controlled Temperature Coefficient of Resonant Frequency of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> Ceramics by Annealing Treatment," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** [6A] 749-51 (2004).

## 조용수



- 1991 연세대학교 세라믹공학과 학사
- 1997 미국 Alfred University 박사
- 2004 미국 DuPont 연구소 Senior Scientist
- 2004~현재 연세대학교 신소재공학과 교수

●● 한찬수



- 2009년 수원대학교 전자재료공학과 학사
- 2009년~현재 연세대학교 신소재공학과 석사과정

●● 조연화



- 2006년 연세대학교 세라믹공학과 학사
- 2006년~현재 연세대학교 신소재공학과 석.박사 통합과정

●● 이준석



- 1992년 연세대학교 요업공학과 학사
- 1994년 연세대학교 세라믹공학과 석사
- 2007년 LG 이노텍 연구소 주임연구원  
아모텍 LTCC 사업부 수석연구원
- 2007년~현재 연세대학교 신소재공학과 박사과정

●● 최익진



- 2007년 연세대학교 금속공학과 학사
- 2009년 연세대학교 세라믹공학과 석사
- 2009년~현재 연세대학교 신소재공학과 박사과정