

수동소자 집적화 기술

송재성*, 김인성**

(*전기연구원 전자기소자연구그룹 그룹장, **선임연구원)

1. 배경

인덕터, 커패시터, 저항으로 대별되는 수동소자는 기존의 벌크형 혹은 삽입형에서, 1990년대 이후 전자기기의 소형화, 특히 포켓용 포털시스템(portal system)의 도입이 시작되면서, 소형화에 대한 요구가 커졌다. 소자의 소형화는 주로 능동소자 중심으로 이루어져, 회로기판에서 수동소자가 차지하는 면적이 70%정도 되기 때문에 향후에는 수동소자의 집적화, 소형화에 관심을 가져야 할 시점이다. 물론, 대용량이 요구되는 분야에 있어서는 여전히 삽입형 수동소자가 이용되고 있고, 소형 수동소자만큼의 신수요 창출은 없지만, 완만한 상승세에 있다.

수동소자의 소형 경량화추세에 따라, 표면실장(SMD)기술이 보편화 되었으며, 이를 위해 소형 칩 형태의 소자들이 속속

개발되어 이용되고 있다. 또한 단순히 적층하여 제조되는 개별소자에서 여러 가지 기능을 복합화하는 수동소자 집적화(MCM) 기술로 넘어가는 단계에 있고 일부는 실용화 단계에 있는데, 수동소자 기술의 발전추이를 그림 1에 나타내었다.

수동소자의 집적화속도가 빠르게 진전되고 있는데, 한 예로, 전압조정발진기(VCO)의 경우 7~8년 전에는 $10 \times 7 \times 2.2\text{mm}$ (0.15cc) 정도가 일반적이었으나, 2000년 초반에는 같은 정도의 기능을 유지한 채 $5 \times 4 \times 1.55\text{mm}$ (0.033cc) 정도의 것이 주류를 이루고있다. 일본의 마쓰시타나 무라타의 경우 0.0244cc 제품을 곧 시판할 것으로 알려져 있는데, 그 추이를 그림 2에 나타내었다.

현재 고주파 대역(radio frequency band)에서 사용되는 고주파 집적회로용 수동소자로서는, MLCC공정을 이용한 SMD형태의 개별소자가 주류를 이루고 있고, 점차 MCM기

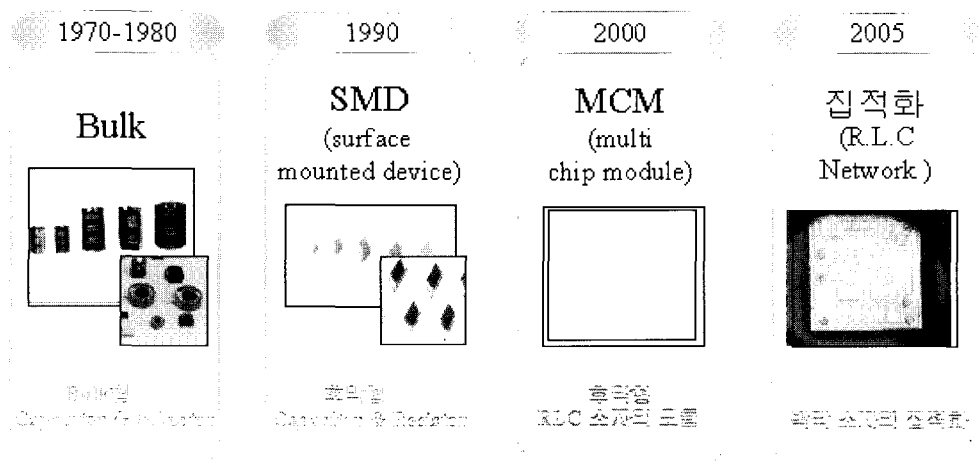


그림 1 수동소자 기술 발전추이

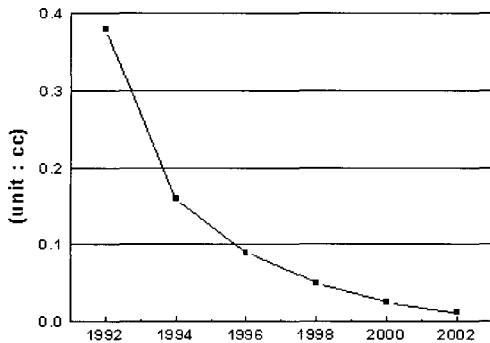


그림 2 VCO(single)의 용적 추이

술이 도입되고 있다. 저주파에서 이용되는 커패시터용 유전체로는 BTS, TiO, ZrTiO, PZT 계가 주로 이용되고 있고, 고주파 대역용 소재는, 전류의 표면 효과, 기판과 도체 사이의 유도자기 현상, 기생 커패시터, 전송선의 자기유도 등에 의해 다른 소자 성분으로 변화하는 기생성분등을 고려하여야 하기 때문에 이에 적합한 재료개발이 요구되고 있다. 즉, 고주파 대역에서 사용 가능한 유전체 조건으로는 첫째, 회로 소자를 소형화하기 위하여 높은 유전상수를 가져야하며, 둘째, 회로 소자의 공진 주파수가 온도에 안정되기 위하여 공진 주파수의 온도계수가 작아야 하고, 셋째, 주파수 특성이 안정되고 높은 Q-factor를 가져야한다.

2. 커패시터와 유전체

스퍼터를 이용한 박막 제조 방법은 유전체 박막을 경제적으로 만들 수 있는 방법중의 하나로, 일본의 후지쯔는 이 방법으로 유전상수 ϵ_r 이 145인 Ba(Zr,Ti)O₃ 박막을 제조하였고 보고하였고, 미국의 일렉트로닉스사는 정전용량 5~50 nF/cm²를 가진 알루미늄나 막을 상빙화하였다. RF 플라즈마를 이용한 CVD 박막 제조방법과 MOCVD방법은 SrTiO₃, (Ba, Sr)TiO₃와 같이 보다 높은 유전상수를 갖는 커패시터를 제조하는데 많이 사용된다. 또한 MOCVD 방법은 우수한 특성의 커패시터를 제작하기 위해서 PbTiO와 PbxLa1-xTiO₃를 증착하고 식각할 때 많이 사용되고 있으며, 이 방법으로는 50~100nm의 박막을 만드는 것이 가능하다.

졸-겔 방법은 보다 높은 유전상수를 갖는 PLZT 조성의 소재를 박막으로 제조하는 경우에 많이 이용되는데, 미국의 AVX 사는 유전상수 1000, 두께 1 μm의 정전용량 1~5 nF를 가진 PZT 박막 커패시터를 졸-겔 방법으로 개발하였다. 졸-겔 방법은 높은 유전율을 가진 입자와 유기/무기 혼성 재료 그리고 유리/세라믹 후막 커패시터의 제조에 널리 응용되고 있으나, 소결 온도가 너무 높아 응용에 제한요소로 작용하고 있다.

표 1 HTCC와 LTCC공정 비교

Characteristics	HTCC	LTCC
Sintering Temp.	> 1400 °C	< 900 °C
Main component	Al ₂ O ₃	Glass ceramic
Dielectric constant	High(~10)	Low(5~7)
Conductivity	good	Ag, Cu(excellent)
Passive component	Impossible	Possible
Strength	Excellent	Good
Hermetic sealing	Excellent	Good
Thermal Conductivity	Good	Poor
TCE	Similar with Si	Similar with Si
Cost	Medium	High

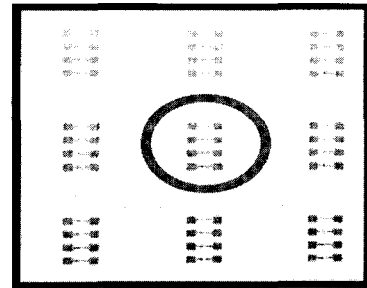


그림 3 박막 커패시터 어레이

스크린 인쇄방법은 LTCC와 HTCC로 대별되는 세라믹 제조 공정과 연계한 대표적인 후막 저항, 커패시터 그리고 인덕터를 제조하는 방법으로 알려져 있다. RuO₂나 IrO₂와 같은 여러 종류의 글라스 세라믹 페이스트를 소자로 만들때 유용한 방법으로, 열처리 온도가 600~1200 °C 의 고온이 요구된다. 후막공정으로 제조된 유전체의 경우, 박막 유전체와 비교했을 때 정전용량 밀도가 낮은 것이 단점이지만, 칩과 기기를 화학적, 물리적, 기계적 변화 등의 외부 환경으로부터 보호하며, 칩이나 모듈을 PCB의 외부 패드에 전기적으로 직접 연결시킬 수 있는 장점이 있어, 발진자, 필터, 듀플렉서등에 주로 이용된다. 표 1은 LTCC와 HTCC공정 비교를 나타낸 것이며, 그림 3은 한국전기연구원에서 제조한 박막 커패시터 어레이 그림이다.

3. 집적화 저항

저항은 회로에서 전류조절 또는 전압분배에 있어서 필수적인 수동소자 부품으로, 저항 설계시 고려할 사항은 적절한 재료의 선택, 면적을 감소시키기 위한 저항 위상조정, 다자인으로, 특히 소재선택은 공정에 미치는 영향이 크므로 아주 중요한 요소이다.

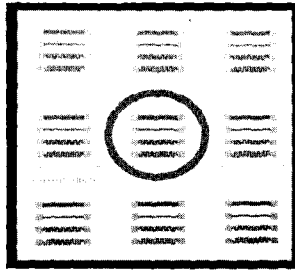


그림 4 박막 저항 어레이

많이 사용되는 저항으로는 PWB 방식으로 다양한 유기 기판 위에 Ni-P 저항 재료를 이용하여 제조된 것이며, 몇몇 회사에서 TaN을 기반으로 하는 저항을 상업화하였다. AT&T 연구소는 8~40 Ω/\square 의 표면저항 R_s 를 갖는 TaSi 칩저항을 개발하였고, 4~360 Ω/\square 의 CrSi, 1~100 Ω/\square 의 TaN, NiCr, 2~4 Ω/\square 을 갖는 TiW, 35~100 Ω/\square 를 갖는 NiCr 재료가 여러 연구팀에 의해 개발되었다.

다른 수동소자와 집적화를 위하여 저항이 갖추어야 할 조건들은 ± 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 의 저항온도 계수를 갖고 (i) 5~50 Ω/\square (ii) 500~1000 Ω/\square (iii) 5~20 k Ω/\square 의 범위에서 sheet 저항을 갖는 것이다. MCM-L 용 재료가 많이 개발되고 있지만, 재현성과 생산성을 높이기 위한 조성 영역확대, 안정성, 증착공정 확립, 집적화 공정에 대한 연구가 더 필요한 단계이다. 낮은 저항은 무전해 도금으로 만드는 것이 적합한 것으로 알려져 있는데, 기초 기술의 측면에서 집적화 수동소자로서 사용하는 데는 공정상의 제한이 있다. 그림 4에 박막 저항 어레이를 나타내었다.

4. 자성체와 인덕터

저항, 커패시터와 함께 수동소자 집적화에 필요한 요소인 인덕터는 100 nH보다 낮은 용량에서는 단일 소자뿐만 아니라 디바이스에서도 기술적 진전이 상당히 이루어져 있다. 100 nH 보다 높은 값을 갖는 경우는, 아직 미진한데, 특별한 재료의 개발과 제조공정개발이 필요하기 때문이다. 단일 부품들은 높은 인덕턴스와 Q값 그리고 낮은 직류 저항을 나타내는 솔레노이드 형태가 일반적이다. 통신용 부품과 같이 높은 주파수의 요구에 따른 누설전류의 증가로 인해 집적화에 어려운 것이 단점으로 알려져 있다. 따라서 전도체 라인의 공간으로부터 유도되는 와전류와 기판의 유전상수가 주요 관심거리이다. 해결책으로는 재료의 설계 측면에서 보다 높은 주파수 대역의 와전류 손실을 줄이기 위해서 높은 저항을 갖는 연질 자성 재료를 선택하는 것이 필수적이다. 또 높은 포화 전류를 얻기 위해서 포화자속밀도가 높은 재료를 이용해

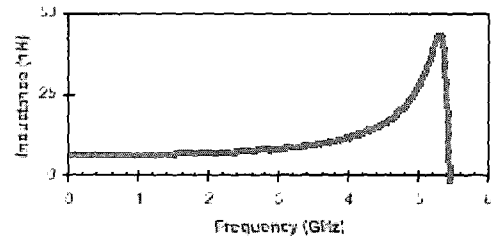


그림 5 인덕턴스와 주파수 특성

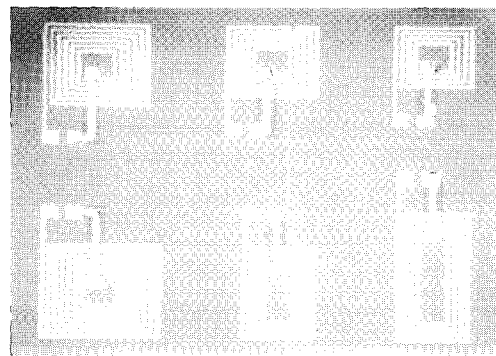


그림 6 인덕터 어레이

야 되고, 인덕턴스를 증가시키고 높은 투자율과 누설 저감을 줄이기 위하여 자성회로를 밀폐해야 할 필요성이 있다.

저항, 인덕터, 커패시터를 집적하는 것보다, 저항과 커패시터를 집적하는 것이 상대적으로 쉬운데, 이는 인덕터가 다양한 기하학적 형태를 가지고 있고 높은 온도에서 열처리해야 하기 때문이다. NiFe 계열과 비정질 CoFeCu 그리고 Supermalloy (NiFeMo)와 같이 자기적으로 전착된 연질 합금이 개별소자로서 여러 분야에서 응용되는데, 특히 NiZn과 MnZn 페라이트로 채워져서 폴리이미드에 스크린 인쇄된 인덕터가 대표적인 것이다.

저주파용(<1MHz) 인덕터는, 0.13 mm의 두께와 4 × 1mm의 형태를 갖는 퍼멀로이 코어의 경우 인덕턴스 0.57~0.67 μH , 1.4~1.8의 Q값을 갖는다. 15 MHz에서는 인덕턴스 1~0.6 μH , Q값 15~17 정도이다. 인덕터에 구리 라인을 형성하기 위해서 전기도금을 이용하기도 하는데, 주파수 1~3GHz에서 인덕턴스 5~50 nH와 Q값 10~30의 특성을 나타내는 연구결과가 있다.

폴리머가 코팅된 알루미늄 코어에 구리 전도 라인을 패터닝하기도 하는데, 코팅방법은 주로 스퍼터링 방법을 사용한다. 이때 인덕턴스는 1.8~137 nH 정도인데, 앞의 그림 6은 스퍼터 방법으로 제조한 박막 인덕터를 나타낸 것이며 그림 5는 제조된 인덕터의 주파수-인덕턴스 특성을 나타낸다.

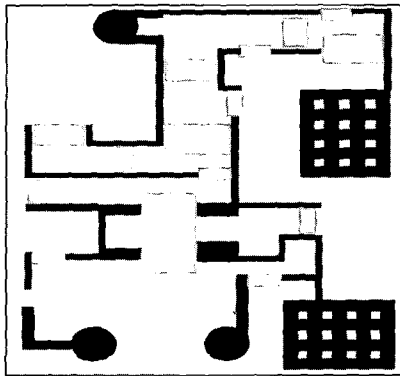
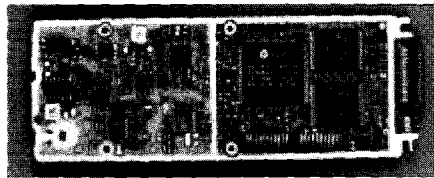


그림 7 전압 발전소자 설계도

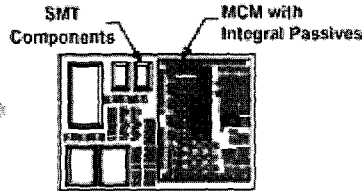
표 2 수동소자의 집적화시 후막기술과 박막기술의 비교

	Ceramic + thick-film technology	Thin-film technology
Process simplicity	-	0
IC packaging	-	+
Board assembly	0	+
Component range	+	-
Tolerances	0	+
Parasitics, EMI	-	0
Component density	0	+
Power handling	0	-

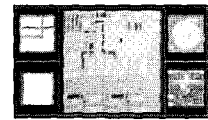
-, poor ; 0, average ; +, good



GPS receiver
12 ICs + 449 Passive



R L C Embedded
87 % area deduction



MMIC, VCO, LAN

그림 8 수동/능동소자 집적화 개념도

표 3 통신 소자중 집적화가 가능한 핵심 부품(굵은 글씨는 수동소자)

구분		주요부품	
내부	RF 부분	전력증폭기(power amplifier), 구동 증폭기(driver Amplifier) 저잡음 증폭기(low Noise Amplifier), 신호혼합기 중간주파수 증폭기(IF Amplifier), 주파수합성기, 고주파집적회로(MMIC), MCM PLL(phase locked loop) 대역통과 필터(BPF: Band Pass Filter), Duplexer	
	IF 부분	자동이득제어기(AGC: automatic gain controller) 중간주파수 신호합성기 및 신호혼합기 BPF(band pass filter)	
	BB 부분	BB 아날로그	저 대역통과필터(LPF: Low Pass Filter) ADC(analog to digital converter) DAC(digital to analog converter)
		BB 모델	채널 부호기 및 복호기, 디지털 변복조기
	기타 수동부품	전압제어발진기(VCO: Voltage Controlled Oscillator) 온도보상형수정발진기 (TCXO: temperature compensated crystal oscillator)	
외부	안테나(antenna), 디스플레이 패널(display Panel)		

RF : radio frequency IF : intermediate frequency BB : base band

5. 수동소자의 직접화

수동소자는 능동소자와는 달리 가격 탄력성이 크다. SMD화로 10% 정도의 가격상승 요인이 있고, MCM기술이 도입되면, 50%이상의 가격상승요인이 발생할 것으로 예측되고 있다. 따라서 이동통신기기와 같이 수동소자의 초소형화가 비가격 경쟁력을 갖는 분야 이외에는 여전히 기존의 고정형 수동소자, SMD가 사용될 것이다.

수동소자 집적화와 관련하여, 기술적인 측면에서 두 가지 검토요인이 있다. 그중의 하나가 소재 선택 및 공정기술 개발이며, 나머지가 소재의 특성을 최대한 활용할 수 있는 소자화로 설계기술이다. 후막공정을 이용한 수동소자 집적화는 주로 LTCC기술을 통해서 구현하는데, 이 방법은 단일 세라믹 기판에 커패시터와 저항, 인덕터를 동시에 집적하는 공정이다.

박막 기술을 기반으로 하는 MCM기술은, 물성 및 공정단순화를 염두에 둔 소재선정, 박막형성, 미세가공기술이 핵심 요소 기술로서, 커패시터는 금속-유전체 혹은 금속-반도체의 결합체, 저항은 NiCr 혹은 TaN₂, 인덕터는 Cu, Au를 주로 이용한다. 그림 7은 LTCC 공정으로 한국전기연구원에서 제작한 전압발진소자이며, 표 2는 집적화 과정에서 후막공정을 채용했을 경우와 박막공정을 이용했을 경우의 특성 비교 표이다.

소재 및 공정기술은 이동통신기기에서의 수요에 힘입어 비약적으로 발전하였다. 그러나 아직도 기판과 소자간의 수축률 차이, 세라믹공정의 재현성 부족 등으로 신뢰성과 수율향상을 위한 연구가 계속되어야 한다. 최근에는 반도체 제조업체에서 반도체와 수동소자를 결합하여 하나의 시스템으로 구성하고자하는 노력을 하고 있다. 일례로 Philips는 수동소자와 MMIC를 결합한 모듈을 발표하였다. 그림 8은 반도체 공정기술을 이용하여, 수동, 능동소자를 집적한 GPS 수신기의 개념도이다. 개별저항은 199개가 3개로, 개별커패시터는 226개가 22개로, 개별인덕터는 24개가 11개로 각각 줄어들었으며, 기판면적도 87%로 줄일수 있다. 표 3은 역시 집적된 수동소자를 이용한 고주파 필터의 특성을 나타내고 있으며, 표 3에 무선 통신 부품중에서 수동소자의 집적화가 요구되는 것을 나타내었다.

개별 및 집적화된 수동소자는 일본의 무라타, 마쓰시타 전자부품, 알프스 전기 등 3사가 세계 시장의 60% 이상을 점유하고 있으며, 국내 시장의 경우도 50% 이상을 일본 업체가 차지하고 있는 가운데, 국내에서는 삼성전기, LG 전자, 한국단자공업 등이 그 뒤를 잇고 있다.

6. 결론

R, L, C 수동소자의 응용은 벌크 소자의 기술이 거의 완성되면서 소형화 고품질화 하는 개별 칩과 이들 칩을 조합한 MCM에 관한 연구가 활발하다. 이 분야에서는 Philips가 선두주자로서, 최근 공심 인덕터를 채용한 집적수동소자를 개발했다고 발표하였다. 그러나 아직은 공심 인덕터를 채용하여 집적수동소자가 대체적으로 큰 편이다. 다른 연구팀들을 중심으로 박막 및 후막 공정 기술을 이용한 R-C 집적화 칩이 개발되었는데, 상당 부분 후막공정을 사용하고 있다.

반도체 및 IC 기술로 축적된 박막 제조 기술은 곧 수 GHz 영역에서 사용 가능한 자심 인덕터, 커패시터 등이 박막형태로 선보여 수년 이내에 수동소자와 능동 소자를 결합한 집적소자가 등장할 것으로 기대되며, 그에 따라 노트북, 휴대폰, 전자제품 등의 소형화, 고 신뢰성 확보에 있어 큰 진전이 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] M. Kee, U. Mackens, R. Kiewitt, G. Greuel and C. Metzmacher, Ferroelectrical Thin Films for Integrated Passive Component, Philips Journal of Research Vol. 51 No.3(1998).
- [2] R. F. Milsom, Electromagnetic Simulation of Passive ICS, Philips Journal of Research Vol. 51 No.3(1998).
- [3] 무선통신 단말 기술/시장보고서 부품 개발 동향, 한국전자통신연구원, 2001.

〈 저 자 소 개 〉



송재성

1980년 서울대 공대 금속공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1991년 동 재료공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 그룹장.



김인성

1987년 한남대 물리학과 졸업. 1992년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 선임연구원.