

내장형 축전기용 유전재료

이호영

서울대학교 기계항공공학부

Dielectric Materials for Embedded Capacitors

Ho-Young Lee

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University

초 록: 최근 전자제품의 경박단소화 추세는 전자기기의 크기와 가격의 감소를 이끌어냈으며, 이러한 추세는 당분간 지속될 전망이다. 이에 따라 내장형 수동소자기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 내장형 축전기 제조기술의 핵심은 높은 유전상수를 갖는 재료를 저온에서 인쇄회로판 위에 형성하는 것이다. 본 고에서는 내장형 축전기용 유전재료로 사용되는 재료들에 관하여 간략하게 소개하고자 한다.

Abstract: The number of passive components used in hand held devices and computers continue to increase so that the passive to active ratio continues to grow. Embedded passives are the best technology for very high component density with increased electrical performance, improved reliability, reduced size, weight and lower cost. Specially embedded capacitors are strongly under development. This paper discusses dielectric materials used in embedded capacitors and remained challenges.

Keywords: Embedded passives, Dielectric materials, Embedded Capacitors

1. 서 론

최근 몇 년 사이에 전자기기에 있어서 크기(size)와 가격(cost)의 감소가 갑작스럽게 일어났고, 이러한 추세는 앞으로도 계속 유지되어 향후 10년 동안에 전자기기의 크기는 현재 크기의 10분의 1로 줄어들고 가격 또한 하락할 것으로 예측된다.¹⁾

VCR, 호출기, 휴대폰, PDA, 캠코더 등과 같은 전자기기는 IC (integrated circuit)들과 같은 능동소자들(active components)과 저항, 축전기, 인덕터와 같은 수동소자들(passive components)로 구성되어 있다.^{2,3)} 오늘날 전자기기에서 이들 수동소자는 능동소자보다 더 많은 수를 차지하고 있다.^{4,5)} 예를 들어, 현재 휴대폰에서 수동소자의 수는 능동소자 수의 20배나 된다.⁵⁾ 이러한 수동소자들은 기판 위에 개별적으로 표면실장(surface mounting)되고 있어 개별 수동소자들(discrete passives)이라 부르며 이들은 전체 기판면적의 80% 정도를 차지하고 있다.^{5,6)} 개별 수동소자들은 인쇄회로판(PWB: Printed Circuit Board)위에 실장

되어 기판과 연결되기 때문에 긴 연결길이(long inter-connection length)로 인하여 기생손실(parasitic loss)이 심한데, 특히 최근 사용 주파수가 증가함에 따라 이 문제는 더욱 심각해졌다. 따라서 개별 수동소자들은 전자기기의 소형화 측면에 있어서 이미 큰 장애물로 부각되었다.^{7,8)}

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 내장형 수동소자기술이 널리 연구되고 있다.⁹⁾ 내장형 수동소자기술은 다층기판(multi-layer substrate)을 제조하면서 동시에 소동소자들도 각 층(layer)에 형성하여 수동소자들이 기판 내에 파묻히도록(embedded) 하는 기술이다. 이 기술이 성공하면 제품의 소형화가 가능하고 신뢰성이 증가하며 연결길이의 감소 인하여 전기적 성능이 향상되고 제조단가가 감소한다. 뿐만 아니라 다양한 설계가 가능해지고 공정이 용이해진다.^{5-7,10-12)}

현재 Georgia Tech의 Packaging Research Center에서는 SOP (System-on-Package)에 응용하기 위한 목적으로 내장형 수동소자들을 연구하고 있다.^{2,5,6,13)} SOP는 축전기, 저항, 인덕터들을 내장하고 있는 여러

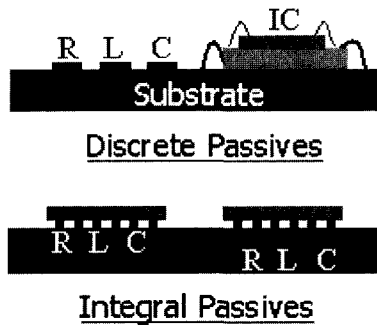


Fig. 1. Embedment of passive components.

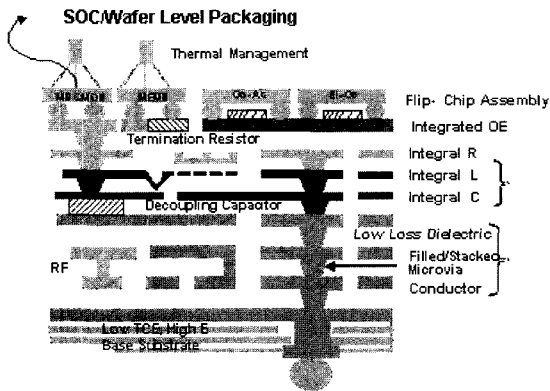


Fig. 2. System-on-Package (SOP).

개의 층으로 이루어진 대면적의 인쇄회로판을 사용하며 각 층은 비아(Via)를 통해서 서로 연결되어 각각의 기능을 수행한다.

인쇄회로판은 유기물로 만들어졌기 때문에 250°C 이상의 온도가 되면 열화(degradation)하기 시작한다.²⁾ 따라서 인쇄회로판과 관련 있는 모든 공정은 반드시 250°C보다 낮은 온도에서 이루어져야 하는데, 이는 SOP를 제조하는데 있어서 상당한 제약으로 작용한다.

여러 수동소자들 중에서 특히 축전기가 많은 관심을 받고 있다.^{4,14,15)} 그 이유는 축전기가 다른 수동소자들에 비하여 회로상에서 수적으로 우세하고 동시에 마이크로일렉트로닉스(microelectronics) 발전으로 인하여 큰 축전용량과 짧은 연결길이를 갖는 디커플

링(decoupling) 축전기를 요구하고 있어^{7,11)} 전기 회로에서 그 중요성이 증가했기 때문이다. 여러 가지 수동소자들 중에서 디커플링 축전기가 차지하는 비율은 60%에 이른다.⁶⁾ SIA (Semiconductor Industry Association)에서 예측한 디커플링 축전기에 요구되는 축전용량을 Table 1에 나타내었다.

축전기는 noise suppression, filtering, tuning, decoupling, bypassing, termination, frequency determination의 중요한 기능을 한다.⁵⁾ 그러나 차지하는 면적이 워낙 크기 때문에 연결길이를 감소시키기 위하여 칩 주변에 위치시키는데 한계가 있다.⁵⁾

일반적으로 축전기는 두 개의 평행한 금속판(metal plate)들 사이에 고유전율 재료(high-dielectric-constant material)가 위치하는 구조를 갖는다. 이때 축전용량 C는 다음과 같이 표현된다.^{5-7,11)}

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{t} \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 자유공간(진공)의 유전상수로 8.854×10^{-12} F/m의 값을 갖으며, A는 전극의 면적, t는 절연층의 두께, ϵ_r 은 절연층의 유전상수(relative dielectric constant)를 의미한다.

이 관계식에 의하면 5 μ m의 절연층 두께를 기준으로 20 nF/cm²의 축전 용량을 갖기 위하여 절연층의 유전상수는 114가 되어야 한다.^{7,11)} 전자기기가 점점 소형화되는 추세를 고려할 때 주어진 공간에서 축전 용량을 증가시키는 것이 필요하고 이는 고유전상수를 갖는 재료의 요구로 이어진다.¹⁶⁾ NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative)의 예측에 의하면 2004년에는 15-25 nF/cm²의 축전용량이 필요한데, 이를 달성하기 위해서는 5 μ m의 절연층 두께를 기준으로 할 때 절연층의 유전상수가 110은 되어야 한다.⁹⁾

내장형 축전기 제조 기술의 핵심은 높은 유전상수를 갖고 재료를 저온에서 인쇄회로판 위에 형성하는 것이다.

본 고에서는 내장형 축전기용 유전재료로 사용되는 재료들에 관하여 간략하게 소개하고자 한다. 내장형 축전기용 유전재료로 사용되는 재료들은 크게 무기재료(inorganic materials), 유기재료(organic materials) 그리고 고분자-세라믹 복합재료(polymer-ceramic composite)로 나눌 수 있다.

2. 무기재료

여러 가지 형태의 무기재료(inorganic materials)가

Table 1. Capacitance (nF/cm²) required for integral decoupling capacitance

Product	1995-1997	1998-2000	2001-2003	2004-2006
Hand held	13	14	17	20
Computers	39	43	51	72

내장형 축전기로 사용되어져 왔다. 이러한 재료들은 스퍼터링(sputtering),⁸⁾ CVD (Chemical Vapor Deposition), 졸-겔법(sol-gel method), 양극산화법(anodization)¹⁷⁾에 의해서 형성될 수 있다. 이러한 방법들에 대하여 살펴보도록 하겠다.

스퍼터링은 오늘날 산업체에서 저항과 축전기에 사용되는 박막을 증착하는 방법으로 널리 사용되고 있다. Fujitsu는 약 145의 유전상수(dielectric constant)를 갖는 Ba(Zr, Ti)O₃ 박막을 개발하였다. Intarsia Corporation은 약 50 nF/cm²의 용량을 갖는 알루미늄(Al₂O₃) 막을 공정에 이용한다. CVD (chemical vapor deposition) 방법과 MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) 방법이 SrTiO₃와 (Ba, Sr)TiO₃ 같은 높은 유전상수를 갖는 축전기의 제조에 역시 이용되고 있다. 플라즈마 (plasma enhanced) MOCVD법은 대용량 축전기에 이용되는 PbTiO₃와 Pb_xLa_{1-x}TiO₃막을 증착하는데 응용되고 있다. 이러한 재료들은 유전상수가 크기 때문에 50~100 nm 범위의 두께면 원하는 축전용량을 얻을 수 있다. 저온 MOCVD법 또한 대면적 패키징(large area packaging)을 위하여 연구되고 있는데, 최근에는 약 34의 유전상수를 갖는 TiO₂막을 180°C 이하의 온도에서 이 방법을 이용하여 인쇄회로판 위에 형성하는데 성공하였고, 이를 통하여 축전용량 110 nF/cm² 이상을 갖는 축전기를 인쇄회로판 위에 형성할 수 있었다. 그러나, MOCVD법으로 증착된 무기재료들은 큰 유전손실(dielectric loss)과 주파수가 증가함에 따라 유전상수가 급격히 감소하는 특성을 보여 실제로 제품에 응용하기에는 어려움이 있어 보인다.

졸-겔 기술은 큰 유전상수를 갖는 PLZT 형태의 박막증착에 이용되어 왔다. Sandia National Laboratory는 PLZT계 재료를 가지고 유전상수 900을 얻는데 성공하였다.¹⁸⁾ AVX Corporation은 최근에 졸-겔 방법을 이용하여 명목상의 유전상수(헥스복에서 찾아볼 수 있는 유전상수)가 대략 1000인 PZT 재료를 1 μm 두께로 증착하여 1~5 nF 범위의 축전용량을 갖는 얻는데 성공하였다. 졸-겔 기술은 미세한 고투자율 입자(fine high permittivity particles), 유기/무기 혼성재료(organic/inorganic hybrid materials) 그리고 후막 글라스/세라믹(thick film glass/ceramic) 재료를 이용한 축전기의 제조에 널리 응용되고 있다. 그러나, 졸-겔법으로 형성한 파우더는 소결을 통하여 제품의 제조에 이용될 수 있는데, 소결시키는데 필요한 소결온도(sintering temperature)가 너무 높아서 MCM-L에 응용하기에는 사실상 불가능해 보인다.

양극산화법(anodization method)은 얇은 유전산화층(thin dielectric oxide layer)을 형성하기 위한 알루미늄과 탄탈륨(tantalum) 막의 진공증착(vacuum deposition)에 이용되어 왔다. 스퍼터 증착된 탄탈륨막은 열적 또는 전기화학적으로 산화되어 얇은 Ta₂O₅ 막으로 변환되어 축전기에 사용된다. University of Arkansas와 Sheldahl Corporation은 허용할 수 있는 누설전류와 절연파괴전압 범위 내에서 유전상수 약 22를 갖는 Ta₂O₅ 막의 형성에 성공하여 50~110 nF/cm² 범위의 축전용량을 갖는 축전기를 제조하였다. General Electric은 양극산화법으로 형성된 Ta₂O₅ 막을 이용하여 약 200 nF/cm²의 축전용량을 갖는 축전기를 형성하였다고 보고 하였다. 양극산화법으로 형성된 대부분의 재료들은 100°C 이상의 온도에서 절연파괴전압이 낮아지기 때문에 양극산화법 또한 실제 제품의 제조에 적용하기에는 한계가 있어 보인다.

3. 유기재료

고유전상수를 갖는 고분자 재료들은 MCM-L에 적용 가능한 내장형 축전기의 제조에 사용되기에는 이상적인 재료이다. 단상(single-phase) 고분자재료는 다상계(multiphase system)가 갖는 혼합(mixing)과 분산(dispersion)으로부터 기인하는 여러 가지 문제점들을 제거해 준다.

여러 연구 기관에서 고유전율 고분자재료를 개발하는 연구가 진행중에 있지만 아직까지 안정하고 공정가능한(processable) 고유전율 고분자재료는 얻지 못한 것으로 알려져 있다. Polyvinyliden fluoride, vinyl cyanide copolymers, 그리고 polyvinylchloride와 같은 강유전성 고분자들(ferroelectric polymers)이 전기장(electric field)에 노출될 경우 이들 재료 내에서는 우선적인 쌍극자방향(preferred dipolar orientation) 및 도메인방향(domain orientation)이 유도된다. 최근에 odd nylons (nylon 7과 nylon 11)는 polyvinyliden fluoride와 유사한 전기적 극성화 특성을 보였다. π-궤도(orbital) 전자의 비편재화(delocalization)는 conjugated polymer들에서 매우 높은 유전상수를 제공하는데, 예를 들어 polyacetylene은 유전투자율(dielectric permittivity) 5.5를 제공한다. Polyacetylene에서의 유전상수는 공중합(copolymerization)을 통하여 polar side group을 도입함으로써 더 증가될 수 있다. 최근 Pennsylvania State University 연구팀은 PVDF copolymer 막에 대하여 먼저 radiation 처리를 하고 곧바로 전기장을 걸어주고 폴링(poling) 시키는 방법으로 약

100의 유전상수를 갖는 PVDF electroactive copolymer를 제조하였다고 보고 하였다. 한편 PVDF계의 높은 유전상수가 radiation 처리없이 폴링(poling)만으로도 가능하다는 것도 보고 되었다. PVDF에서 유전상수의 증가는 폴링(poling) 이전의 결정질(crystallite)의 뒤틀림(distortion)에 기인하는데, 이러한 결정질의 뒤틀림은 순수한 고분자상(pure polymer phase)의 유전 상수를 100까지 향상시킬 수 있다. 그러나, 이러한 방법은 단가(cost), 노출면적, 낮은 수율 그리고 다음 공정과의 적합성의 문제로 한계가 있어 대면적의 내장형 축전기의 제조에 적용하기에는 한계가 있다.

4. 고분자-세라믹 복합재료

전통적으로 높은 유전상수와 적은 유전손실로 인하여 세라믹재료가 축전기의 유전재료로 사용되어져 왔다. 그러나, 세라믹재료를 깨지기 쉽고 공정이 어려워 기계적 강도가 낮아 내장형 축전기에 사용되기에는 적합하지 않은 측면이 많다.

인쇄회로판이 열적에 의한 열화를 일으키지 않고 견딜 수 있는 최대 온도가 대략 250°C이기 때문에, 이 온도 이하에서 반드시 모든 공정이 이루어져야 하기 때문에 고분자재료가 유전재료로 고려되고 있기는 하다. 고분자재료는 세라믹재료가 갖는 대부분의 약점을 극복할 수 있지만 유전상수가 워낙 낮아 고충전용량의 요구에 부응할 수 없다는 치명적인 단점이 있어 실제로 제품의 제조에 적용하기에는 어려움이 있어 보인다.

세라믹재료와 고분자재료가 갖는 각각의 단점을 보완하고 서로의 장점을 살려 우수한 유전특성을 얻고자 개발된 것이 바로 고분자-세라믹 복합재료이다.^{15,19-23)} 높은 유전상수를 갖는 세라믹입자와 고분자재료를 혼합하여 만든 고분자-세라믹 복합재료(composite)는 유전상수가 크면서도 유연하며, 강도가 크고, 가볍으며, 저온에서도 공정이 가능하다는 장점이 있다.

고분자재료는 저온공정을 가능하게 하고 유기바인더(organic binder)의 역할을 하여 경화되면서 높은 유전상수를 갖는 세라믹입자를 기계적으로 지지해주며, 세라믹입자는 높은 유전상수를 제공한다.³⁾ 고분자재료로는 보통 3-4의 유전상수를 갖는 에폭시(epoxy)가 사용되며, 세라믹입자(충진제)로는 유전상수 3000을 갖는 Barium Titanate나 유전상수 19316을 갖는 Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate (PMN-PT) 등이 사용된다.⁵⁾

세라믹 충진제의 입자 크기는 복합재료의 유효유전상수(effective dielectric constant)에 민감하게 영향을 미친다. 1 μm 이하의 반경을 갖는 세라믹입자를 사용하여 제조한 복합재료를 고분자-세라믹 나노복합체(polymer-ceramic nanocomposite)라 부르는데,⁷⁾ 이러한 2상(two-phase) 나노복합체는 축전기 뿐 아니라 저항과 인덕터에도 응용될 수 있다. 고분자-세라믹 나노복합체의 전형적인 유전 상수는 10~100이고 4~25 nF/cm² 축전용량을 갖는다.

이러한 고분자-세라믹 복합재료는 저온 MCM-L 또는 MCM-L/D에 사용되는 박막축전기(thin film capacitor)의 제조에 이용될 수 있을 정도로 충분히 우수한 특성을 갖는다. 고분자-세라믹을 이용하여 내장형 축전기를 제조하기 위해서는 다음과 같은 조건들이 충족되어야 한다.¹²⁾

① 고분자와 세라믹입자 사이의 결합력(binding)이 우수해야 한다.

② 약 100의 유전상수가 얻어질 수 있어야 한다.

③ 5 μm 정도로 얇게 만들 수 있어야 한다.

④ 균일하게 도포(±5% 이내)될 수 있어야 한다.

⑤ 유전손실인자(tan δ)는 0.01보다 작아야 한다.

⑥ 저온에서 형성(curing) 가능

⑦ 고온에서 안정해야 한다.

⑧ 흡습율이 낮아야 한다.

⑨ 여러 가지 재료(구리, interlayer-dielectrics, 기판)에 대하여 접착력이 강해야 한다.

⑩ 높은 pH를 갖는 무전해 도금조(electroless-plating bath)에서 견딜 수 있어야 한다.

⑪ 우수한 기계적 성질을 갖어야 한다.

무질서하게 섞여 있는(randomly dispersed) 2상 복합체(two-phase composite)의 유효유전상수(effective dielectric constant)에 대하여 이론과 실험결과를 토대로 많은 일반화된 식들(generalized equations)이 유도되었다. 그 중에서 가장 일반적으로 사용되는 식은 Lichtenecker 로그 법칙(Lichtenecker logarithmic law)에 근거하여 만들어진 Lichtenecker식(Lichtenecker equation)으로, 이를 식 (2)에 나타내었다.

$$\log \epsilon = v_1 \log \epsilon_1 + v_2 \log \epsilon_2 \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 2상 복합체의 유효유전상수를 의미하고, ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 제 1상과 제 2상의 유전상수를 의미하며, v_1 과 v_2 는 각각 제 1상과 제 2상의 부피분율을 의미한다.

$$\log \epsilon = v_1 \log \epsilon_1 + v_2 \log \epsilon_2$$

Lichtenecker식을 개선하여 만든 개선된 Lichtenecker식 (modified Lichtenecker equation)도 있다. 개선된 Lichtenecker식을 식 (3)에 나타내었다.

$$\log \epsilon = \log \epsilon_1 + v_2(1 - k) \log \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) \quad (3)$$

여기서 k 는 fitting factor를 의미한다. 이 식은 반경험적인(semi-empirical) 식이기 때문에 시스템이 바뀔 때마다 매번 fitting factor k 를 실험을 통하여 결정하여야만 한다.⁷⁾ 잘 분산되어 형성된 고분자-세라믹 복합체의 경우 k 는 대략 0.3 근처의 값을 보인다고 한다.²⁷⁾

2상 복합체의 유효유전상수(effective dielectric constant)는 충전제(filler)나 기지상(matrix phase) 모두 높은 유전상수를 갖는 재료를 선택함으로써 최대화 될 수 있다. 또한 높은 충진을 그리고 성장(morphology)과 구조(structure)의 최적화를 통하여 충전입자들이 유전상수에 더 잘 기여하도록 해 줄때에도 최대화 될 수 있다.¹⁸⁾ Fig. 3은 충전되는 재료의 배열상태에 따른 유효유전상수의 변화를 보여주고 있다.

고분자-세라믹 복합체의 유효유전상수는 PMN-PT (lead magnesium niobate-lead titanate)와 Barium Titanate와 같은 고유전 상수를 갖는 세라믹 입자들을 어떻게 고분자 내에 효과적으로 채워 넣느냐(filling)에도 의존한다.²⁸⁾ 너무 많은 충전제 함량은 복합재료 내에 많은 기공(porosity)들을 형성하는데, 이러한 기공들은 유효유전상수를 감소시키는 역할을 한다²⁸⁾. 현탁액(suspension) 내의 용매(solvent)의 함량 및 스펀코팅(spin coating) 속도 또한 고함량으로 충전된 고분자-세라믹 나노복합체의 유효유전상수에 영향을 미친다.^{8,28)}

높은 축전용량을 갖기 위해서는 절연층이 얇아야

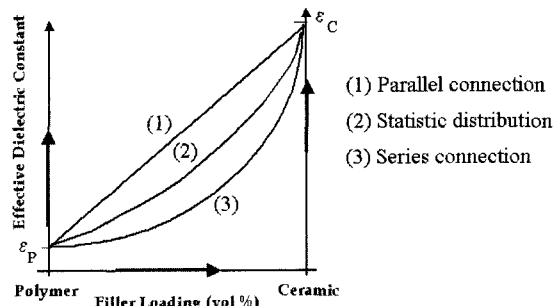


Fig. 3. Variations of effective dielectric constant as functions of filler loading.

하며 동시에 결함(defect)이 적어야 한다.²⁸⁾ 절연층의 두께가 감소할수록 충전되는 입자의 크기도 작아져야만 매끄럽고 결함이 없는 막을 얻을 수 있다.²⁸⁾ 2 μm 두께의 막을 형성하기 위해서는 300 nm보다 작은 크기를 갖는 입자가 요구되어진다.²⁸⁾

Rao 등은 85% 부피의 세라믹 입자충진을 통하여 유전상수 150을 얻는데 성공하였고,⁵⁾ 최근에는 에폭시(epoxy)-은(silver) 복합재료를 통하여 유전상수 1000을 갖으면서도 0.019의 낮은 유전손실인자를 갖는 유전재료의 제조에 성공하였다.²⁹⁾

5. 맺음말

본 고에서는 내장형 축전기용 유전재료로 사용되는 재료들에 관하여 간략하게 살펴보았다. 앞으로 좀 더 성능이 우수한 내장형 축전기의 제조가 필요하며, 이를 위해서는 기술적인 몇 가지 문제를 반드시 해결하여야 한다.

기술적으로 해결해야 할 문제들에는 낮은 절연과 피전압, 높은 누설전류밀도, 높은 유전손실인자(tand), 낮은 유전상수 및 유전상수의 불안정성, 그리고 저온 공정이 있다. 그 외에도 공정이 용이하여 실제로 공정을 적용하는데 큰 어려움이 없어야 한다.

참고문헌

1. R. R. Tummala, "Electronic Packaging Research and Education in the 21st Century at PRC", Proc. 1998 IEMT/IMC Symp., Omiya, Japan, Apr., pp. 185-194 (1998).
2. R. R. Tummala, P. Chahal and S. Bhattacharya, "Recent Advances in Integral Passives at PRC", IMAPS 35th Nordic Conference, Sweden, September (1998).
3. J. Y. Park and M. G. Allen, "Packaging-Compatible High Q Microinductors and Microfilters for Wireless Applications", IEEE Trans. Adv. Packag., 22(2), 207 (1999).
4. S. K. Bhattacharya and R. R. Tummala, "Next generation integral passives: materials, processes, and integration of resistors and capacitors on PWB substrates", J. Mater. Sci: Materials in Electronics, 11, 253 (2000).
5. Y. Rao, J. Yue and C. P. Wong, "High K Polymer-ceramic Nano-composite Development, Characterization, and Modeling for Embedded Capacitor RF Application", Proc. 51st Electronic Components and

- Technology Conference, pp. 1408-1412 (2001).
6. Y. Rao, S. Ogitani, P. Kohl and C. P. Wong, "Novel High Dielectric Constant Nano-structure Polymer-ceramic Composite for Embedded Capacitor Application", Proc. 50th Electronic Components and Technology Conference, pp. 183-187 (2000).
 7. Y. Rao, J. Qu, T. Marinis and C. P. Wong, "A Precise Numerical Prediction of Effective Dielectric Constant for Polymer-Ceramic Composite Based on Effective-Medium Theory", IEEE Trans. Comp. Packag. Technol., 23(4), 680 (2000).
 8. S.-D. Cho and K.-W Paik, "Study on the amorphous Ta₂O₅ Thin Film Capacitors Deposited by DC Magnetron Reactive Sputtering for Multichip Module Applications", Mater. Sci. Eng. B, 67, 108 (1999).
 9. S. Ogitani, S. A. Bidstrup-Allen and P. A. Kohl, "Factors Influencing the Permittivity of Polymer/Ceramic Composites for Embedded Capacitors", IEEE Trans. Adv. Packag., 23(3), 313 (2000).
 10. T. Thongvigitmanee and G. S. May, "Modeling and Optimization of Integral Capacitor Fabrication Using Neural Networks", Proc. Electronics Manufacturing Technology Symposium 2000, Twenty-Sixth IEEE/CPMT International, pp. 47-54 (2000).
 11. Y. Rao, C. P. Wong and J. Qu, "Self-consistent Model for Dielectric Constant Prediction of Polymer-Ceramic Composite", Proc. International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces 2000, pp. 44-49 (2000).
 12. S. Bhattacharya, R. R. Tummala, P. Chahal and G. White, "Integration of Polymer/Ceramic Thin Film Capacitor on PWB", Proc. 3rd International Symposium on Advanced Packaging Materials, pp. 68-70 (1997).
 13. R. R. Tummala, G. White, V. Sundaram and S. Bhattacharya, "SOP: The Microelectronics for the 21st Century with Integral Passive Integration", Proc. IMET/IMC Microelectronics Packaging Innovation for the New Century, Sonic City-Omiya, Tokyo, pp. 267-275, April (1999).
 14. B. A. Shutzberg, C. Huang, S. Ramesh and E. P. Giannelis, "Integral Thin Film Capacitors: Materials, Performance and Modeling", Proc. 50th Electronic Components and Technology Conference, pp. 1564-1567 (2000).
 15. S. Ramesh, C. Huang, S. Liang and E. P. Giannelis, "Integrated Thin Film Capacitors: Interfacial Control and Implications on Fabrication and Performance", Proc. 49th Electronic Components and Technology Conference, pp. 99-104 (1999).
 16. S. Ogitani, S. A. Bidstrup-Allen and P. Kohl, IPC Conference, April 2-6, San Diego, CA (2000).
 17. H. M. Clearfield, S. Wijeyesekera, E. A. Logan, A. Luu, D. Geiser, C. M. Lin and J. Jing, "Integrated Passive Devices Using Al/BCB Thin Films", Proc. 3rd Adv. Technol. Workshop Integr. Passives Technol., Denver, CO, Apr. (1998).
 18. J. Prymak, S. Bhattacharya and K. Paik, "Fundamentals of passives: discrete, integrated, and embedded", in Fundamentals of Microsystems Packaging, Ed. Rao R. Tummala, McGRAW-HILL, New York (2001).
 19. S. K. Bhattacharya, R. R. Tummala, M. G. Allen, P. Kohl, S. A. Bidstrup-Allen, G. White, S. Streiffer, A. Singh and A. Kingon, "Next Generation Filled-polymer Dielectrics", Proc. IMAPS 2nd Int. Conf. Emerging Microelectron. Interconnect Technol., Bangalore, India, pp. 308-313, Feb. (1998).
 20. V. Agarwal, P. Chahal, R. R. Tummala and M. G. Allen, "Improvements and Recent Advances in Nanocomposite Capacitors Using A Colloidal Technique", Proceeding of the 48th Electronic Components and Technology Conference, pp. 165-170 (1998).
 21. P. Chahal, R. R. Tummala, M. G. Allen and M. Swaminathan, "A Novel Integrated Decoupling Capacitors for MCM-L Technology", Proceeding of the 46th Electronic Components and Technology Conference, pp. 125-132 (1996).
 22. S. Liang, S. R. Chong and E. P. Giannelis, "Barium Titanate/Epoxy Composite Dielectric Materials for Integrated Thin Film Capacitors", Proceeding of the 48th Electronic Components and Technology Conference, pp. 171-175 (1998).
 23. S. Ogitani, S. A. Bidstrup-Allen and P. Kohl, "An Investigation of Fundamental Factors Influencing the Permittivity of Composite for Embedded Capacitor", Proceeding of the 49th Electronic Components and Technology Conference, pp. 77-81 (1999).
 24. N. Jayasundere and B. V. Smith, "Permittivity for Binary Piezoelectric 0-3 Composites", J. Appl. Phys., 73(5), 2462 (1993).
 25. H. S. Nalwa, "Polymer-ferroelectric ceramic composites", in Ferroelectric Polymers, New York: Marcel Dekker, Ch. 11 (1995).
 26. T. Yamada, T. Ueda and S. T. Kitayama, "Piezoelectricity of a High-content Lead Zirconate Titanate/Polymer Composite", J. Appl. Phys., 53(5), 4328 (1982).
 27. S. Ogitani, S. A. Bidstrup-Allen and P. Kohl, "Embedded Capacitor Manufacture Based on Thin-Film Process", Proc. 23rd Int. Electron. Manufact. Technol. Symp., Austin, TX, Oct. pp. 199-205 (1998).

28. H. Windlass, P. M. Raj, D. Balaraman, S. K. Bhattacharya and R. R. Tummala, "Processing of Polymer-Ceramic Nanocomposites for System-On-Package Applications", Proc. 51st Electronic Components and Technology Conference, 1201 (2001).

<부 록>

(1) Review of Integral Capacitor Technology

Industry/Institution	Materials	Approach	Highest ϵ_r Achieved	Highest C (nF/cm ²)	Ref.
Cornell University	Polymer/ceramic	Colloidal dispersion	40		1
TPL Industries	Nanocomposites	Surface treatment		25	2
3M Corporation		Roll to roll process		10	3
Georgia Institute of Technology		Dispersion control	135	22	4, 37
IBM		Conventional mixing	47		5
Chalmers University of Tech, Sweden	Polymer/BaTiO ₃ / Carbon	Conventional mixing	1960		24
Ormet Corporation		Dry film/curtain coating	40	4	6
Institute for surface chemistry, Sweden	Nanocomposites	Dispersion optimization			25
Matsushita Electric Works	Polyphenyleneoxide- TiO ₂	Lacquered film-gravure coat	12		32
Advanced Technology Materials	BST	MOCVD		3000	7
Massachusetts Inst. of Tech.	High k polymers	Electroactive polymers	300,000		8
Pennsylvania State Univ	PVDF and copolymers	Radiation cross-linking	100		9
German Plastic Institute		Chemical modification	11		10
Shizuoka University	Cyanopolymers	Polar functionality	23		11
Sandia National Laboratories	PZT and PLZT	Sol-gel	900		12
University of Delhi, India	BaTiO ₃		370		26
Princeton University	Hydrothermal BT	Organo-metallic precursors			30
Hitachi Res. Lab., Hitachi Ltd., Japan	Ta _x O _y	Sol-gel; Photo Irradiation	28		28
Electr.&Automation (Tech.Univ),Russia	PZT, SrBiTa Oxide films	Sol-gel		7000- 9000	35
Nanyang Tech. University, Singapore	Ba-Ti-B Glass Ceramic	Sol-gel, thick film printing	1000		29
AVX Corporation	PbZT	Sol-gel		2500	19
Queens Univ. of Belfast, UK	BT, PMN, PZN-BT	Pulsed Laser Deposition	1000		31
Osaka University, Japan	Sr-Bi-Ta Oxide thin film				34
Singapore Inst. of Microelectronics	SiN _x	PECVD	33		13
AT&T Bell Labs				40	14
University of Arkansas	Ta _x O _y	Anodization	22	50-180	15
GE, Sheldahl, ASU, RPI		DC Magnetron Sputtering	44	200	16, 17
Motorola	Ta _x O _y	RIE, Sputter deposition		500	33
ULVAC Japan Ltd.	SrBi ₂ Ta ₂ O ₉	RF Magnetron Sputtering			36
Fujitsu	Ba(Zr,Ti)O ₃	Sputter	146		18
GE	Diamond like carbon			25	16
DuPont	Glass ceramics	MCM-C			20
Murata Mfg. Co. Ltd., Japan	BT	Hydolysis	1560		27
Intarsia	Al ₂ O ₃	MCM-D		50	21
NCHIP				50	22
Georgia Institute of Technology	PbTiO ₃ , Pb _x La _{1-x} TiO ₃	MOCVD	500,000	400	23
	TiO ₂		38	110	

(2) References

1. S. Liang, S. Chong and E. Giannelis, "Barium titanate/epoxy composite dielectric materials for integrated thin film capacitors", *Proc. 48th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 171-175 (1998).
2. K. Slenes and K. Law, "A polymer-ceramic composite for integrated capacitors", *IMAPS Advanced Technology Workshop in Integrated Passives*, Denver, (1998).
3. N. O'Bryan, "Making embedded capacitors by roll-to-roll process", *IMAPS Integrated Passive Advanced Technology Workshop*, Denver, (1998).
4. V. Agarwal, P. Chahal, R. Tummala, and M. Allen, "Improvements and recent advances in nanocomposites capacitors using a colloidal technique", *Proc. 48th Electronic Components and Technology Conference*, p.165. (1998).
5. F. Levy, "High dielectric loaded films," *Advanced Materials & Manufacturing Processes*, pp. 309-326 (1988).
6. L. Brandt, "New materials for embedded passive components", *PAN Pacific Microelectronics Symposium Proceedings*, IMAPS, pp. 195-199 (1998).
7. G. Stauf, C. Seegel, R. Watts, and H. O'Bryan, "Modified stoichiometry for integrated RF capacitors", *IMAPS Advanced Technology Workshop on Integrated Passives*, Denver, (1998).
8. H. Pohl, "Superdielectric polymers", *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, pp. 683-692 (1986).
9. T. R. Shrout, W. Hackenberger, S. J. Jang, Q. M. Zhang, and C. A. Randall, "Novel dielectric materials", *IMAPS Advanced Technology Workshop in Integrated Passives*, Denver, (1998).
10. B. Jungnickel, "PVDF and its blends," in "Ferroelectric Polymers", H. Singh Edited, Marcel Dekker, (1995).
11. S. Tasaka, "Cyanopolymers" in "Ferroelectric Polymers", H. Singh Edited, Marcel Dekker (1995).
12. D. Dimos, S. J. Lockwood, and M. Rodgers, "Thin film decoupling capacitors for multichip module". *Proc. 44th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 894-899 (1994).
13. A. Trigg, "Thin film resistors and capacitors for multichip modules", *Proc. 48th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 228-231 (1998).
14. T. Lenihan, L. Schaper, Y. Shi, G. Morcan and J. Parkerson, "Embedded thin film resistors, capacitors, and inductors in flexible polyimide films", *Proc. 46th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 119-124 (1996).
15. D. Nelms, R. Ulrich, L. Schaper and B. Bowen, "Fabrication and performance of integrated capacitors on silicon and flexible substrates", *Proc SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3582, pp. 441-446 (1998).
16. H. Kapadia, H. Cole, M. Nielsen and N. Krishnamurthy, "Necessary characterization of integral passives for high performance applications", *Integrated Passive Advanced Technology Workshop*, Denver, (1998).
17. E. J. Rymaszewski, T.-M. Lu, M. C. Nielsen and J.-Y. Kim, "Integrated Discrete Components", 193rd Meeting of the Electrochemical Society, San Diego, CA, May (1998).
18. M. Tsukada, J. Cross, M. Nishizawa, K. Kurihara, and N. Kamehara, "Preparation and characterization of dielectric thin films for decoupling capacitors", *Proc. ICEMCM*, pp. 347-352 (1995).
19. D. Liu, R. Kennedy, G. Korony, S. Makl, J. Mevissen, J. Hock and R. Heistand, "Integrated thin film capacitor arrays", *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3830, pp. 431-437 (1999).
20. K. Coates, *IMAPS Proceedings of Multichip Module*, 1998, p.490.
21. H. M. Clearfield, S. Wijeyesekera, E. Logan, A. Lu, D. Gieser, C. Lin, and J. Jing, "Integrated passive devices on Multichip Modules and High Density Packaging", pp. 478-483 (1998).
22. T. Takken and D. Tckerman, "Integral decoupling capacitance reduces multichip module ground bounce", *Proc. 43rd Electronic Components and Technology Conference*, pp. 79-84 (1993).
23. Z. Nami, O. Mismar, A. Erbil and G. S. May, "Computer simulation study of the MOCVD growth of titanium dioxide film", *J. Crystal Growth*, 171, 154 (1997).
24. M. S. Ardi, W. Dick and D. H. McQueen, "Dielectric properties of epoxy-barium titanate-carbon black composites", *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 24(3), 157 (1995).
25. L. Bergstorm, K. Shinozaki, H. Tomiyama and N. Mizutani, "Colloidal Processing of a Very fine BaTiO₃ Powder - Effect of Particle Interactions on the Suspension Properties, Consolidation, and Sintering Behavior", *J. Am. Ceram. Soc.*, 80(2), 291 (1997).
26. H. B. Sharma and A. Mansingh, "Sol-gel processed barium titanate ceramics and thin films", *J. of Materials Science*, 33, 4455 (1998).
27. Y. Sakabe, N. Wada, J. Ikeda, and Y. Hamaji, "Ceramic for Ultra-thin Dielectric Layer of Multilayer Ceramic Capacitors", *IEEE Int. Symp. Appl.*

- Ferroelectrics, pp. 565-569 (1998).
28. T. Ohishi, S. Maekawa and A. Katoh, "Synthesis and properties of tantalum oxide films prepared by the sol-gel method using photo-irradiation", *J. of Non-Crystalline Solids*, 147 & 148, 493 (1992).
 29. K. Yao, W. Zhu and X. Yao, "Development of Ba-Ti-B Glass-Ceramic thick-film capacitors by sol-gel technology", *IEEE Transactions on CPMT -Part C*, 21(1), 20 (1998).
 30. E. B. Slamovich and I. A. Aksay, "Structure Evolution in Hydrothermally Processed (<100C) BaTiO₃ Films", *J. Am. Ceram. Soc.*, 79(1), 239 (1996).
 31. D. O'Neill, G. Catalan, F. Porras, R. M. Bowman and J. M. Gregg, "Thin film ferroelectric for capacitor applications", *J. of Materials Science, Materials in Electronics*, 9, 199 (1998).
 32. S. Simamoto, Y. Sakata, J. Kojima, N. Kume and Y. Tsujimoto, "Lacquered Polymer-Ceramic Composite Dielectric Film for Capacitors", *IEEE Int. Symp. Electrical Insulation*, pp. 140-143 (1992).
 33. B. Martin, C. Basceri, S. Strifer and A. Kingon, "Electrical properties of integrated Ta₂O₅ metal-insulator-metal capacitors", *Electrically Based Micro-structural Characterization II*, Proc. Mater. Res. Soc. Symp., 500, 101 (1998).
 34. M. Noda, H. Sugiyama and M. Okuyama, "Study on a metal-ferroelectric-oxide-semiconductor structure with thin silicon oxide film using SrBi₂Ta₂O₉ ferroelectric films prepared by pulsed laser deposition", *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 Regul. Pap. Short Note Rev. Paper*, 38(9), 5432 (1999).
 35. K. Vorotilov, M. Yanovskaya, E. Turevskaya and A. Sigov, "Sol-gel derived ferroelectric thin films: avenues for control of microstructural and electric properties", *J. Sol Gel Sci. Technol.*, 16(1-2), 109 (1999).
 36. K. Suu, T. Masuda, Y. Nishiyoka and N. Tani, "Preparation of SrBi₂Ta₂O₉ ferroelectric thin film by rf magnetron sputtering", *Integr. Ferroelectr.*, 21(1-4), pt 1, 407 (1998).
 37. H. Windlass, P.M. Raj, S. Bhattacharya and R. R. Tummala, "Optimized Suspension Formulations For Improved Dielectric Properties of Ceramic-Polymer Nanocomposites For Integral Capacitors", *IMAPS Advanced Technology workshop of Integral Passives*, Denver, Colorado, April 29-30, (2000).