Journal of the Microelectronics & Packaging Society
Vol. 11, No. 1, p. 71-76. 2004

LTCC 기술을 이용한 집적형 컴라인 대역 통과 여파기

임옥근* · 김용준**

*삼성전기 중앙연구소 광소자&MEMS Lab
**연세대학교 기계공학부 마이크로시스템 연구실

Embedded Combline Band-Pass Filter using LTCC Technology

Ohk-Kun Lim* and Yong-Jun Kim**

*Photonics & MEMS Lab, Samsung electro-mechanics co., Ltd
**Microsystems Lab., School of Mechanical engineering, Yonsei University

초 록: 무선 이동 통신에 응용할 수 있는 소형의 집적된 형태의 여파기를 LTCC기술과 인터디지털 커패시터(Interdigital capacitor)를 가진 컴라인 타입(Combline type)의 구조를 이용해 구현했다. 또한 T 패턴을 가지는 마이크로스트립(Microstrip) 타입의 공진기를 이용해 LTCC 기판의 전기적 성능을 측정했다. 구현된 여파기는 인터디지털과 컴라인 구조를 이용해 2.7 mm × 2.03 mm의 비교적 소형으로 구현할 수 있었고 5.09 GHz의 중심주파수에서 1.8 dB의 삽입손실, 37.6 dB의 반사손실, 그리고 280 MHz의 대역폭을 가졌다. 제안된 여파기는 작은 크기와 간단한 구조로 인해 여러 가지 LTCC기판의 집적형 여파기로 응용될 수 있을 것이다.

Abstract: A compact embedded tapped-line combline filter with interdigital capacitors using low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology for wireless application is proposed. Also, in-situ measurement using T-pattern microstrip resonator was performed to acquire exact knowledge of electrical properties of the LTCC substrate. The proposed filter makes it possible to realize a relatively small size, 2.7 mm × 2.03 mm, by employing interdigital and combline structure. It shows 1.8 dB insertion loss, 37.6 dB return loss, and 280 MHz bandwidth at the center frequency of 5.09 GHz. Its small size and simple structure make it a good candidate as an integrated filter for various LTCC substrates.

Keywords: LTCC, combline, interdigital capacitor, embedded, filter

1. 서 론

무선 이동 통신이 일반화되면서 점점 더 작은 크기의 무선통신 모듈에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이런 수요에 부응하기 위해선 먼저 무선통신 모듈을 구성하는 부품들의 소형화뿐만 아니라 부품간의 집적성 또한 향상되어야 할 것이다. 대역 통과 여파기는 무선 통신모듈의 핵심부품이면서도 다른 부품에 비해 비교적 크기가 큰 편에 속하기 때문에 이러한 소형화 추세에 따라 다양한 여파기들이 제안되고 있다. Surface Acoustic Wave (SAW) 여파기나 Film Bulk Acoustic Resonator (FBAR) 여파기들은 소형이면서도 좋은 성능을 가지지만, 그 특수한 재료와 구조로 인해 다른 부품들과의 집적성이 좋지 않다는 단점이 있다[1]. 다른 부품들과의 집적성을 높이기 위해 유전율이 낮은 물질을 유전체로 사용한 여파기들도 제안되었는데, 이 경우 관내파장이 너무 길어져 소형화 하는데 한계가 있다[2]. 집적된 소형의 수동소자들을 이용해 여파기를 구현할 경우 구조가 복잡해

*Corresponding author
E-mail: cmcp@yonsei.ac.kr

질 뿐만 아니라 주파수가 올라갈수록 기생효과가 증가한다는 단점이 있다[3-4].

완전히 집적된 형태의 소형 여파기를 구현하기 위해 본 논문에서는 다층구조의 인터디지털 (interdigital) 형태의 커패시터를 가지는 컴라인 (combline) 형태의 여파기를 제안했다. 제안된 여파기는 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 고주파에서도 안정적인 전기적 특성을 가지는 LTCC 기판에 집적된 형태로 제작되었다. 컴라인 구조는 마이크로스트립 라인의 (microstrip line) 최상단에 커패시턴스를 (capacitance) 부하함으로써 물리적 길이의 변화 없이 전기적인 길이를 늘일 수 있는 장점이 있다. 또한 탭라인 (tapped-line) 형태의 입출력단을 사용함으로써 공간 절약뿐만 아니라 다른 소자들과의 집적성도 높일 수 있었다[5]. 커패시턴스를 부하하기 위해 일반적으로 사용되는 Metal-Insulator-Metal (MIM) 형태의 커패시터를 사용하지 않고 다층구조의 인터디지털 타입의 커패시터를 사용함으로써 전체적인 크기를 더 줄일 수 있었다.

2. 디자인

2.1 컴라인 여파기

Fig. 1에서 알 수 있듯이 일반적인 컴라인 여파기는 한쪽 끝단을 접지시키고 반대편 끝단에 커패시턴스를 부하해 물리적인 길이를 줄이는 반면 전기적인 길이를 늘인 공진기를 병렬로 연결한 형태를 가진다. 이 논문에서는 공진기 한쪽 끝단의 커패시터로 작은 크기를 가지면서도 많은 정전용량을 가지는 다층구조의 인터디지털 커패시터를 사용했다. 공진기의 전기적인 길이는 일반적으로 45° 정도지만 커패시턴스을 조절함으로써 10° 에서 88° 까지 변경 가능하다[6]. 탭라인을 이용한 컴라인 여파기의 디자인은 1988년 Caspi와 Adelman 에 의해 발표된 바 있다[7]. 먼저 구현하고자 하는 여파기의 사양에 따라 여파기의 차수와 로우 패스 프로토타입의 (low-pass prototype) 요소 값을 (element value) 구한 뒤 중심주파수에서 공진기의 전기적 길이와 어드미턴스(admittance)를 구한다. 접지면부터 탭라인 입력단까지의 길이와 부하하는 커패시턴스의 값은 다음의 식을 이용해 구할 수 있다.

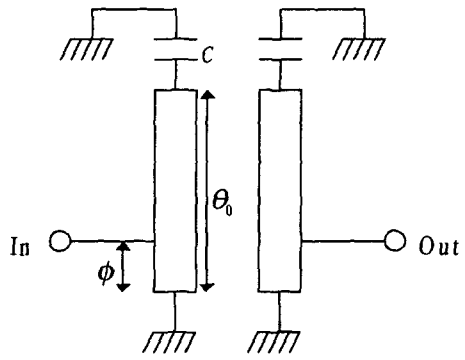

Fig. 1. Schematic view of the tapped-line combline filter

$$b = \left(\frac{Y_a}{2}\right)\cdot\left[\frac{\theta_0}{sin^2\theta_0} + cot\theta_0\right] \tag{1}$$

$$J_{i,i+1} = \frac{w\cdot b}{\sqrt{g_i\cdot g_{i+1}}} \qquad i = 1, 2\ldots N-1 \tag{2}$$

$$Y_{i,i+1} = J_{i,i+1}tan\theta_0 \tag{3}$$

$$\phi = sin^{-1}\left[\frac{Y_a\cdot w(cos\theta_0 sin\theta_0 + \theta_0)}{2g_0 g_1 Y_A}\right] \tag{4}$$

$$C = \frac{Y_a cot\theta_0}{\omega_0} \tag{5}$$

여기서, 각각의 변수들은 아래와 같다.

N: order of low pass prototype filter,
g_i: element values of low pass prototype (i=0 to N),
w: fractional bandwidth,
Y_A: source and load admittance,
Y_a: resonator line admittance,
θ_0: electrical length of resonator at center frequency,
ϕ: electrical length from ground to input line,
C: loading capacitance

다층구조의 인터디지털 커패시터의 유효 유전율은 전자기 해석 프로그램을 사용해 S-파라미터 (S-parameter)를 추출한 뒤 다음의 식을 이용해 계산함으로써 구할 수 있었다[8].

$$C_{eff} = -\frac{1}{\omega \cdot \mathrm{Im}(Z_{in})} \quad (6)$$

여기서,

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + S_{11} + S_{22} + S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{1 - S_{11} + S_{22} - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}$$

2.2 디자인 고려 사항

유전체의 두께가 제안된 여파기의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 다른 구조적인 요소들은 변화시키지 않고 유전체의 두께만을 변화시키면서 삽입손실과 대역폭의 변화를 살펴봤다. Fig. 2에서와 같이 유전체의 두께가 증가할수록 삽입손실은 감소하는 반면 대역폭은 커짐을 알 수 있었다. 이는 유전체의 두께가 두꺼워질수록 접지층에 비해 두 공진기 사이의 거리가 짧아져 서로간의 커플링이 증가한 원인으로 판단된다. 제안된 여파기는 위와 같은 정보를 바탕으로 삽입손실과 대역폭간의 관계를 시뮬레이션한 뒤 유전체의 두께를 400 μm로 정했다. 다음으로 유전체의 유전상수값이 여파기의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 앞에서와 같이 유전상수값만 변화시켜가며 중심주파수와 대역폭의 관계를 알아 보았다. 같은 여파기 구조에서 높은 유전상수 값은 관내파장을 짧게 만들고 더 많은 에너지를 유전체내에 한정시키므로 작은 대역폭과 낮은 중심주파수를 가지게 됨을 알 수 있었다. 일반적인 LTCC 기판은 비교적 고온의 소결과정을 거치기 때문에 공정에 따라 유전상수값이 변하게 됨으로 T 패턴 마이크로스트립 (microstrip) 공진기를 이용해 유전율 값을 측정했다.

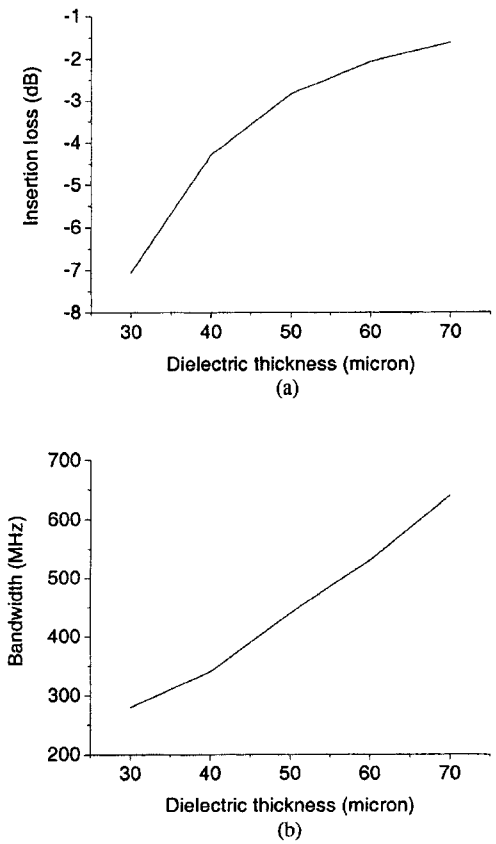

Fig. 2. Combline filter characteristics according to the dielectric thickness, (a) Dielectric thickness vs. Insertion loss and (b) Dielectric thickness vs. Bandwidth.

2.3 T 패턴 마이크로스트립 공진기

유전체의 전기적 특성은 특성임피던스, 위상속도 등에 영향을 끼치기 때문에 효과적인 디자인을 위해서는 유전체의 전기적 특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. LTCC 기판의 유전상수값을 넓은 주파수대역에 걸쳐 간단한 방법으로 파악하기 위해 Fig. 3에서와 같은 T 패턴 마이크로스트립 공진기를 사용했다. T 패턴 마이크로스트립 공진기는 스텁(stub)의 물리적인 길이가 전기적인 파장길이의 1/4일때 공진이 일어나므로 유전상수의 변화에 따라 공진 주파수가 달라지게 된다. 위와 같은 원리를 이용해 S-파라미터 데이터,S_{21},를 네트워크 에널라이저로 (Network Analyzer) 측정함으로써 유전상수를 알아낼 수 있다. 유전상수는 다음의 공식을 이용해 구할 수 있었다[9-10].

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{n \cdot c}{4 \cdot L_{Stub} \cdot f}\right)^2 \quad (7)$$

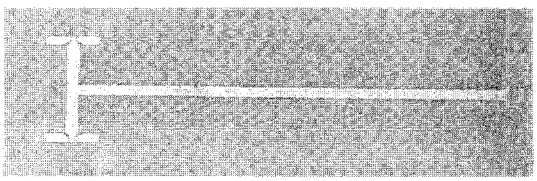

Fig. 3. Photograph of the T-pattern microstrip resonator

$$\varepsilon_r = \frac{\sqrt{1+12\cdot\frac{h}{w}}(2\varepsilon_{eff}-1)+1}{\sqrt{1+12\cdot\frac{h}{w}}+1} \quad (8)$$

여기서,

ε_{eff}: *effective dielectric constant*
ε_r: *relative dielectric constant*
n: mode of resonance
c: speed of light
L_{Strub}: *stub length [m]*
f: resonance frequency [Hz]
h: dielectric layer thickness [m]
w: microstrip line width [m]

3. 측 정

T 패턴 마이크로스트립 공진기와 제안된 탭라인 형태의 컴라인 여파기는 0.4 mm 두께의 LTCC 기판 위에 4층구조로 제작되었다. 네트워크 에널라이저 (Wiltron360B)와 Cascade microtech사의 air coplanar 타입의 200 μm와 500 μm의 피치를 (pitch) 가지는 그라운드-시그널-그라운드 (Ground-Signal-Ground) 형태의 프로브 팁을 (prove tip) 이용해 측정했다. 정확한 측정을 위해 Thru-Reflect-Line (TRL) 캘리브레이션 (calibration) 방법을 사용했다.

3.1 LTCC 기판의 유전율

듀폰사의 951 페이스트와 6142B 실버페이스트를 (silver paste) 이용해 제작한 LTCC기판을 1~20 GHz 범위의 유전상수 값을 측정했다. Fig. 3에서 보듯이 사용된 T 패턴 마이크로스트립 공진기의 스텁 길이는 19.26 mm 이고 폭은 0.5 mm 였다. 측정한 S-파라미터 값과 유전상수 값이 각각 Fig. 4와 Table 1에 나타나 있다. 제작된 LTCC 기판은 5 GHz 대역에서 약 7.84의 유전상수 값을 가짐을 알 수 있었다.

Table 1. Measured dielectric constant data of the LTCC substrate

f(GHz)	1.65	5	8.34	11.56	14.8	18.01
ε_{eff}	5.56	5.47	5.45	5.56	5.62	5.65
ε_r	7.97	7.84	7.81	7.98	8.06	8.12

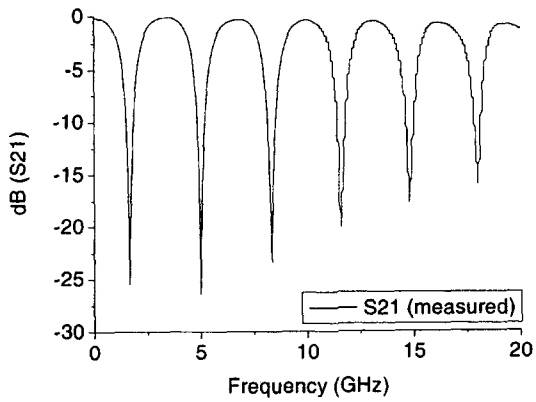

Fig. 4. Frequency response of the T-pattern microstrip resonator

3.2 여파기 특성

LTCC 기판 위에 구현된 여파기의 사진과 3차원 도가 각각 Fig. 5와 Fig. 6에 나와있다. 구현된 여파기는 5.09 GHz의 중심주파수에서 1.8 dB의 삽입손실, 37.6 dB의 반사손실, 그리고 280 MHz의 대역폭을 가짐을 알 수 있었다. 측정을 위한 입출력단을 제외한 여파기의 전체 크기는 2.7 mm × 2.03 mm 이다. 제안된 여파기의 중심주파수는 5.4 GHz로 계산했었는데, 실제 측정결과는 5.09 GHz를 보여 중심주파수가 예상보다 낮게 나왔음을 알 수 있었다. 원인으로는 다층구조의 인터디지털 커패시터를 사용함으로써 생긴 비아 홀(Via hole)과 공정오차로 인한 추가적인 기생효과 때문으로 판단된다[11]. 하지만 비아홀의 (via hole) 영향에 대한

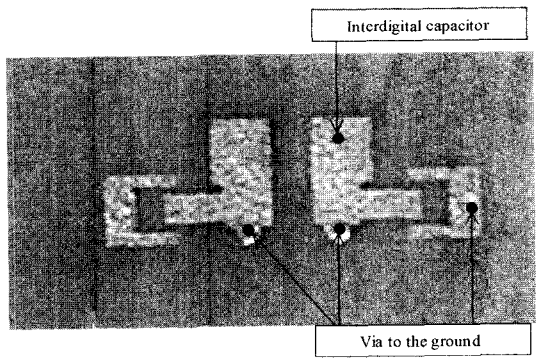

Fig. 5. Photograph of the fabricated filter

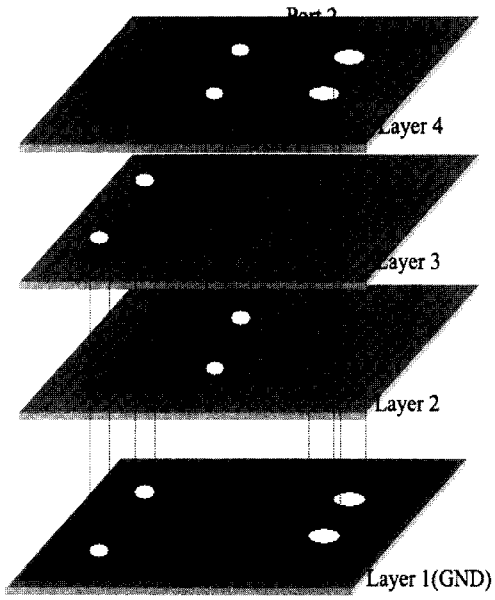

Fig. 6. Three-dimensional view of the proposed filter

Fig. 7. Cross-sectional view of the fabricated filter

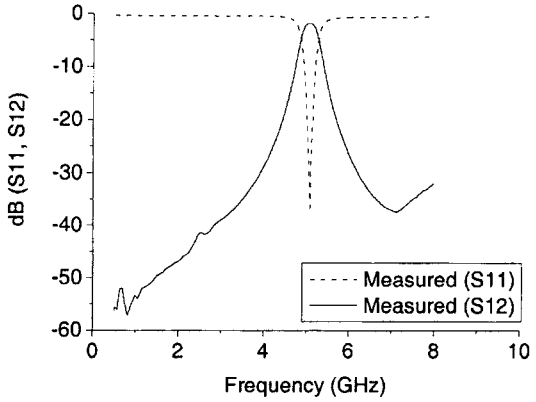

Fig. 8. Measured characteristics of the fabricated filter

분석과 공정 오차에 대한 연구를 계속 진행한다면 충분히 극복할 수 있는 오차라 생각한다.

4. 결 론

집적된 형태의 대역 통과 여파기가 컴라인 구조를 이용해 비교적 작은 크기로 구현되었다. 뿐만 아니라 다층구조의 인터디지털 커패시터와 탭라인 타입의 입출력단을 사용함으로써 전체적인 여파기의 크기를 더욱 더 줄이고 다른 소자들과의 집적성도 향상시켰다. 제안된 여파기는 각각 0.1 mm 두께를 가지는 4층 구조의 LTCC 기판에 집적된 형태로 구현되었고 5.09 GHz의 중심주파수에서 1.8 dB의 삽입손실과 37.6 dB의 반사손실, 그리고 280 MHz의 대역폭을 가졌다. 구현된 여파기는 5 GHz 대역의 ISM (Industrial, Scientific and Medical) 대역에서의 응용가능성 뿐만 아니라 튜닝을 통해 다양한 주파수대역에서 LTCC 기판 위에 작은 크기로 완전히 집적된 형태의 여파기 구현 가능성을 충분히 보여주었다.

Table 2. Geometrical parameters of the fabricated filter

Physical length of resonator at center frequency (θ_0)	0.73 mm
Physical length from ground to input line (ϕ)	0.1 mm
Microstrip width	0.8 mm
Spacing between the resonators	0.7 mm
Interdigital capacitor plate	1 × 1.1 mm

참고문헌

1. S. V. Krishnas wamy, J. Rosenbaum, S. Horwitz, C. Vale, and R. A. Moore, "Film bulk acoustic wave resonator technology", in: Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium, (Honolulu, HI, USA, 4-7 Dec 1990), pp. 529-536
2. Ohk-Kun Lim and Yong-Jun Kim, "Design and Fabrication of an Integrated Band Pass Filter Using Micromachining", in: Proceedings of the fifth Korean MEMS conference, (Jeju, Korea, 15-17, May 2003), pp. 344-347
3. Ho-Young Lee, "Embedded Passives", Journal of the Microelectronics and Packaging Society, Vol. 9. Issue 2, pp. 55-60(2002).
4. A. Sutono, J. Laskar, and W. R. Smith, "Development of integrated three dimensional Bluetooth image rejection filter", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, (Boston, Massachusetts, USA, 11-16 June 2000), Vol. 1, pp. 339-342.
5. J. S. Wong, "Microstrip Tapped-Line Filter Design", IEEE Transactions on Microwave Theory and Tech-

niques, MTT-27(1), pp. 44-50(1979).
6. Mi-Hyun Son, Sung-Soo Lee, and Yong-Jun Kim, "Low cost realization of ISM Band Pass Filter Using Integrated Combline Structure", IEEE Radio and Wireless Conference, (Denver, Co, USA, 10-13 Sept. 2000), pp. 261-264
7. S. Caspi, and J. Adelman, "Design of Combline and Interdigital Filters with Tapped-Line Input", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, pp. 759-763(1998).
8. W. Blood, F. Ling, T. Kamgaing, T. Myers, and M. Petras, "Simulation, Modeling, and Testing Embedded RF Capacitors in Low Temperature Cofired Ceramic", in: Proceedings of Electronic Components and Technology Conference, (Orlando, FL, USA, 29 May-1 June 2001), pp. 852-857.
9. D. I. Amey and J. P. Curilla, "Microwave Properties of Ceramic Materials", in: Proceedings of Electronic Components and Technology Conference, (Atlanta, GA, USA, 11-16 May 1991), pp. 267-272.
10. Y. S. Lee, K. C. Kim, S. D. Park, and J. C. Park, "A Comparison of High Frequency Properties of LTCC Substrate Systems", Journal of the Microelectronics and Packaging Society, Vol. 9. Issue 3, pp. 7-12(2002).
11. B. Matinpour, A. sutono, and J. Lasker, "A Low-Power Direct Receiver Module for C-band Wireless Applications", IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, (Phoenix, AZ, USA, 20-22 May 2001), pp.852-857.
12. C. S. Yoo, W. S. Lee, N. K. Kang, and J. C. Park, "Analysis of Stripline Structure(Resonator) in LTCC System", Journal of the Microelectronics and Packaging Society, Vol. 9. Issue 3, pp. 13-17(2002).