

24 GHz 대역을 위한 LTCC 기판 적용된 수동소자 구현

이지연 · 유종인[†] · 최세환 · 이재영

한국전자기술연구원 ICT·디바이스패키징연구센터

Implementation of Passive Elements Applied LTCC Substrate for 24-GHz Frequency Band

Jiyeon Lee, Jongin Ryu[†], Sehwan Choi, and Jaeyoung Lee

ICT · Device Packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI),
Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea

(Received May 20, 2021; Corrected June 14, 2021; Accepted June 18, 2021)

초 록: 본 논문에서는 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 기판을 적용하여 24 GHz 대역 회로에서 활용될 수 있는 수동소자 라이브러리를 구현하였다. 회로에서 사용 목적에 따라 큰 용량 값의 수동소자가 필요하며, 기본 구조인 전극 커패시터와 Spiral 구조 인덕터로 설계할 수 있지만, SRF(Self-Resonant Frequency)가 사용 주파수인 24 GHz 보다 낮아 고주파 영역에서는 활용이 불가능하다. 이러한 주파수 한계를 해결하기 위해, DC와 고주파 영역 사용 수동소자를 분류하여 제안하였다. 기본 구조는 DC와 같은 1~2 GHz 미만의 낮은 주파수 사용에 적합하다. 24 GHz 대역인 고주파용으로는 마이크로스트립 $\lambda/8$ 길이 stub 구조를 제안하였고, open 및 short stub 구조는 각각 커패시터 및 인덕터로 동작하고, stub 고유의 임피던스 값을 가진다. 여기서 임피던스 계산식을 통해 수동소자 용량 값을 얻을 수 있다. 본 논문에서 고안한 수동소자는 유전율 7.5인 LTCC 기판으로 제작하고 측정하여, DC 사용 기본 구조 커패시터와 인덕터는 각각 2.35~30.44 pF, 0.75~5.45 nH 용량의 라이브러리를 구성하였다. 고주파 영역에서 사용 가능한 stub 구조의 커패시터와 인덕터는 각각 0.44~2.89 pF, 0.71~1.56 nH 으로 라이브러리를 구축하였다. 측정을 통해 용량 값을 다양화하는 방법을 검증하였으므로 더욱 세분화된 라이브러리를 구현할 수 있으며, 사용 주파수 24 GHz 대역의 레이더 모듈에서 다층 기판 동작 회로와 집적화할 수 있는 수동소자의 대안이 될 것이다.

Abstract: In this paper, by applying LTCC substrate, the library of the passive elements is implemented. And it can be used in 24 GHz circuits. Depending on how to use it to the circuit, it is required large value by designing the basic structures such as electrode capacitor and spiral inductor. However they are not available in high-frequency domain, because their SRF(Self-Resonant Frequency) is lower than the frequency of 24-GHz. By solving the limit, this paper devised passive elements classified for the DC and the high-frequency domain. The basic structure is suitable for low frequency under 1~2 GHz like DC. The microstrip $\lambda/8$ length stub structure is proposed to use for high-frequency like 24-GHz. The open and short stub structure operate as a capacitor and inductor respectively, also they have their impedances. Through their impedances, we can extract the value with the impedance-related equation. In this paper, the proposed passive elements are produced with the permittivity 7.5 LTCC substrate, the basic structure which are available in the DC constituted a library of capacitance of 2.35 to 30.44 pF and inductance of 0.75 to 5.45 nH, measured respectively. The stub structure available in the high-frequency domain were built libraries of capacitance of 0.44 to 2.89 pF and inductance of 0.71 to 1.56 nH, calculated respectively. The measurements have proven how to diversify value, so libraries can be built more variously. It will be an alternative to the passive elements that it is possible to integrate with the operation circuit of radar module for the frequency 24-GHz.

Keywords: LTCC, passive element, capacitor, inductor, stub

[†]Corresponding author
E-mail: aceryu@keti.re.kr

© 2021, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

무선통신 시스템을 갖춘 모바일 기기, 드론 등에서 부품의 경량화와 소형화에 대한 요구는 계속해서 증가하고 있다. 이에 따라 적층형 모듈 형태의 SOP (System-on-package)로 수동소자 등 전자회로를 단일 기판에 집적할 수 있어 부품의 소형화가 가능하다. 대표적으로 LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) 공정 기술로 전자회로 부품의 SOP가 가능하다. 또한 LTCC는 유전율 7.5와 같이 고유전율을 이용하므로 소자의 소형화를 이룰 수 있어 전체적으로 사이즈를 작게 제작할 수 있으며, 세라믹 재질 기판으로 이루어져 부품의 경량화에 큰 기여를 한다.^{1,2)}

본 논문은 24 GHz 대역에서 동작하는 레이더 모듈에 적용하기 위한 다양한 용량 값을 갖는 수동소자 라이브러리를 구현하였다. 기판 제작으로는 LTCC 공정기술을 선택하였고, 적층형 다층 구조로 수동소자를 설계할 수 있으며, 단층 구조로 제작하는 것 보다 수동소자 용량 값을 더 다양하게 구현할 수 있다. 밀리미터파 대역에서 레이더 모듈에 적용하기 위해 수동소자를 DC, 고주파 영역 사용 수동소자로 구분하여 제시한 사례가 있다. 24 GHz 대역에서도 마찬가지로 높은 용량을 갖는 수동소자는 SRF (Self-Resonant Frequency)가 사용 주파수인 24 GHz 보다 낮아 고주파 영역에서는 사용 불가능하다. SRF 한계를 해결하기 위해 본 논문에서도 DC, 고주파 영역 사용 수동소자를 분류하여 고안하였다.³⁾

2장 2절에는 기본형인 전극 구조의 커패시터를 설계하

였고, 마이크로스트립 stub 구조를 추가하여 24 GHz 대역 주파수에서 적용 커패시터를 제시하였다. 2장 3절에서는 기본형인 spiral 구조와 마이크로스트립 stub 구조 인덕터를 설계하였고, 2장 4절에는 수동소자 구현 및 측정 결과, 3장에는 결론으로 구성하였다.

2. 본 론

2.1 LTCC 기판 구성

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 다층 구조 단면을 가지는 적층형 LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic) 기판으로 수동소자를 설계하고 제작하였다. 유전체로 구성되는 세라믹 재료는 TEMEN 社의 TCP-L7SH 그린시트를 사용하였으며, 시트의 두께는 140 μm으로 공정이 완료되면 약 100 μm로 수축된다. 각각의 시트마다 Ag paste가 사용된 도체 패턴 또는 via를 포함하며, 도체 패턴은 스크린 프린팅 기법을 이용하고, 시트에서 via 위치에 펀칭된 빈 공간을 스퀴지를 이용하여 페이스트를 채워 via를 형성한다. 각 시트의 via 및 도체 패턴 작업이 완료되면 60°C에서 적층이 진행되고, 최대 875°C인 온도프로파일을 통해 소성 과정을 거쳐 하나의 LTCC 기판으로 완성된다.

Fig. 1에서 가장 아래의 Ag paste로 이루어진 도체층은 주변 회로와 집적을 위해 공통접지 층으로 사용하였다. Table 1과 같이 두께 10 μm 도체 Ag paste 층 사이의 유전체 TCP-L7S는 공정 완료 후의 수축을 고려하여 두께

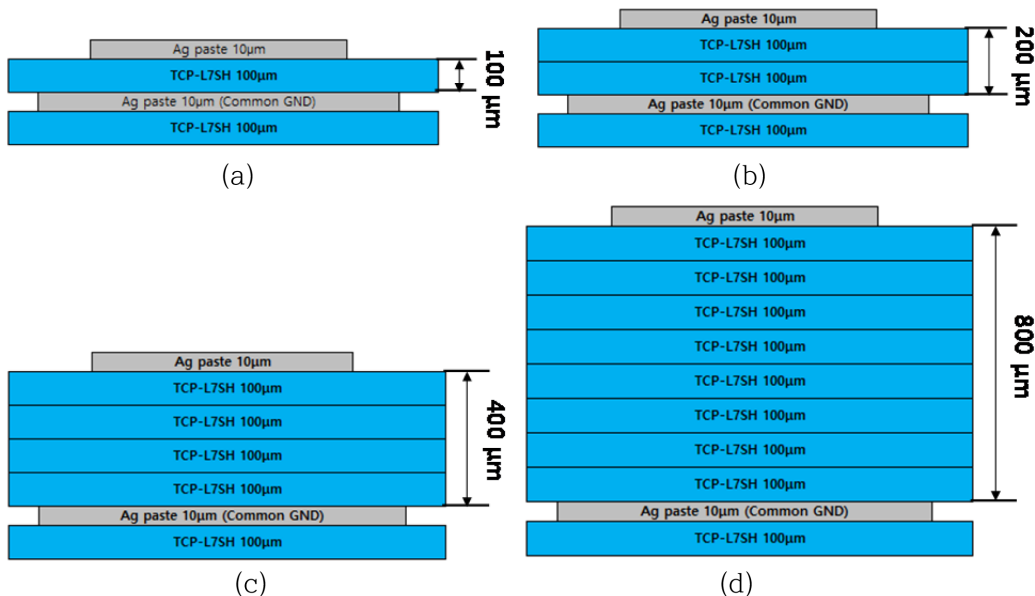


Fig. 1. Layer configurations of LTCC substrate. The height of substrate is (a) 100 μm. (b) 200 μm. (c) 400 μm. (d) 800 μm.

Table 1. Characteristics of materials.

Material	Permittivity	Dielectric loss tangent	Permeability	Conductivity
Ag paste	-	-	0.99	5.5×10^7
TCP-L7SH	7.5	0.005	1	-

를 100 μm 로 반영하였으며, 유전체만 고려하였을 때 설계 가능한 최소 기판 높이는 100 μm 이고, Fig. 1의 (a)~(d)와 같이 기판 높이를 200, 400, 800, ... μm 등으로 다양하게 설계할 수 있다. 본 논문은 설계 S/W로 SONNET을 사용하였으며, Table 1과 같이 유전체 TCP-L7SH는 유전율 7.5, 유전 손실 0.005, 투자율 1을 설정 값을 입력하였으며, 도체 Ag paste는 투자율 0.99, 전도도 5.5×10^7 으로 설정하여 설계를 진행하였다.

2.2 커패시터 설계

Fig. 2의 (a)와 같이 커패시터는 2개의 전극이 일정한 간격을 두고 평행하게 위치한 형태가 기본 구조이며, 전극 사이에 전하가 저장되어 전기장의 형태로 에너지로 충전된다. 여기에서 커패시터 용량(C)는 커패시터가 얼마나 많은 전하를 저장하는지 알려주는 지표이며, 전극의 면적이 클수록 큰 용량 값을 얻을 수 있다. Fig. 2의 (a)와 같이 2개의 전극만으로 커패시터 용량을 크게 설계하면, 전체적으로 기판 회로 면적이 커지게 되어 모듈 회로의 소형화를 이룰 수 없다. 효율적으로 커패시터를 설계하기 위해, 본 논문에서는 Fig. 2의 (b)와 같이 4개의 전극을 사용하였고, 2개의 전극으로 설계할 때 보다 같은 면적 대비 큰 용량 값으로 설계할 수 있다. Fig. 2의 (b)와 같이 0층과 2층의 전극을 via로 연결하고, 1층의 전극과 3층 전극도 연결하여 0층 양단에 리드선을 형성하였다. Fig. 3에서 커패시터의 리드선 선폭 W_m 은 임피던스가 50 Ω 인 마이크로스트립 선폭 260 μm 이며, 층간 패턴을 연결하는 via의 직경 D_v 는 150 μm 으로 설계하였다. 이 때, 시뮬레이션 편의상 원이 아닌 직사각형으로 모델링하였으며, 둘의 결과 차이는 거의 없다. 전극의 면적이 0.8 mm (= X_e) \times 0.8 mm (= Y_e) 일 때, 전극 4개 구조 커패시터 용량은 1.42 pF이고, 전극 2개 구조는 0.6 pF이므로 제안한 구조의 용량이 2배 이상 크다.

Fig. 4는 전극 4개 구조로 설계한 커패시터 시뮬레이션 결과이며, 주파수에 따른 커패시터 용량 값을 보여준다. Fig. 4에서 검은 색 실선으로 표현된 용량 1 pF 커패시터는 11 GHz 이전까지 용량의 부호가 (+)이며, 7.8 GHz 이후부터는 부호가 (-)가 되어 더 이상 커패시터가 아닌 인덕터로 동작하게 된다. 이처럼 수동소자가 반대로 동작하게 되는 주파수를 SRF(Self-Resonant Frequency)라고 한다. 전극의 면적이 큰 경우가 작을 때의 경우 보다 포함

된 인덕턴스의 성분이 더 크므로, 주파수가 높아짐에 따라 커패시턴스와 인덕턴스가 공진이 되어 SRF 주파수에서 용량 값이 0이 되고, 이후 주파수에서는 반대의 성분인 인덕터로 동작하게 되는 것이다. 따라서 Fig. 4에서 빨간색 실선으로 표현된 용량 3 pF 커패시터의 SRF는 5.4 GHz이며, 용량이 커질수록 SRF는 낮아짐을 알 수 있다.

기본형인 전극 구조 커패시터는 SRF가 사용주파수인 24 GHz 보다 낮아 고주파 영역에서 커패시터로 사용하기에는 구조의 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 Fig. 5(a)와 같이 마이크로스트립 $\lambda/8$ 길이 open stub 구조를 추가하여 커패시터를 제시한다. 이 때, Fig. 5(b)와 같이 stub를 구성하고, 기본적으로 마이크로스트립이므로 유전율 7.5를 고려한 파장으로 $\lambda/8$ 길이인 L_m 은 600 μm 이다. W_m 은 50 Ω 마이크로스트립 선폭인 260 μm 를 적용하였으며, Fig. 6에서 stub의 임피던스 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다. 임피던스 결과에서 $\lambda/8$ 길이 open stub의 24 GHz에서 임피던스는 스미스차트 아래쪽 반원 외곽에 위치하고,

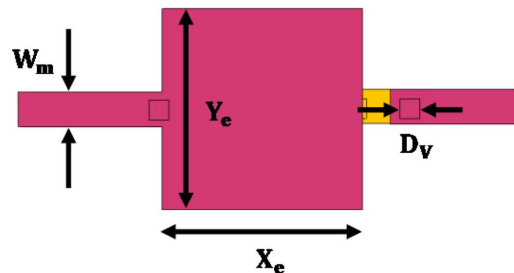


Fig. 3. Top view of basic capacitor structure.

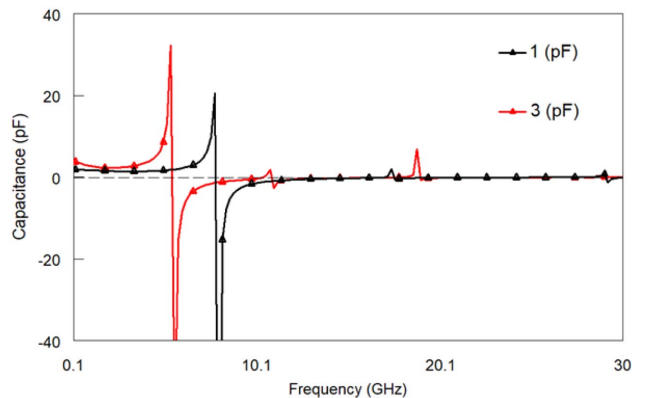


Fig. 4. Capacitance result simulated according to frequency under designed 1 pF and 3 pF.

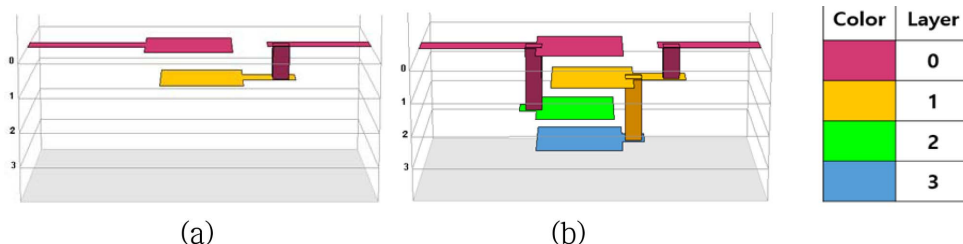


Fig. 2. Basic capacitor structures. (a) A capacitor with 2 electrodes. (b) A capacitor with 4 electrodes.

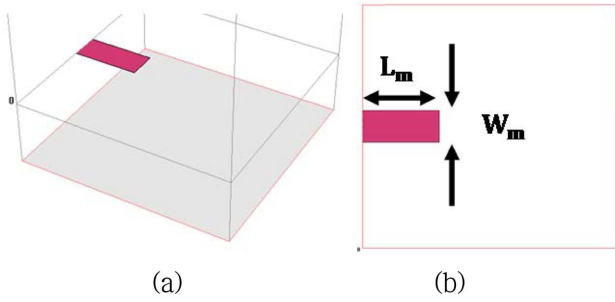


Fig. 5. λ/8-length open stub structure. (a) Full view of λ/8-length open stub. (b) Top view of λ/8-length open stub.

값은 $-j$ 이며 lossless 커패시터로 동작함을 알 수 있다. 제안된 stub구조에서 용량 값을 구하기 위한 원리는 다음과 같다.

$$Z_L(W, h, \epsilon_r) = \frac{Z_{L1}(W, h)}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{Z_{F0}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(f_u \frac{h}{W} + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{W}\right)^2}\right) \quad (1)$$

(with $Z_{L1}(W, h) = \frac{Z_{F0}}{2\pi} \cdot \ln\left(f_u \frac{h}{W} + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{W}\right)^2}\right)$, $f_u = 6 + (2\pi - 6) \cdot \exp\left(-\left(30.666 \cdot \frac{h}{W}\right)^{0.7528}\right)$)

우선 임피던스 관련 내용을 살펴보면 다음과 같다. 식 (1)은 Hammerstad와 Jensen이 고안한 선폭(W), 기판높이(h)와 유효 유전율(ϵ_r)을 갖는 마이크로스트립의 임피던스(Z_L) 관계식을 나타낸다.⁴⁾ (1)로부터 마이크로스트립 구조에서 임피던스는 선폭(W)이 좁을수록, 기판 높이(h)가 두꺼울수록 커짐을 알 수 있다. 즉, 선폭(W)과 기판 높이(h)를 달리하여 임피던스 크기를 조절할 수 있다.

임피던스는 $Z = R + jX$ 이며 저항(R)과 리액턴스(X)로 구성된다. λ/8 길이 open stub로 설계된 커패시터의 임피

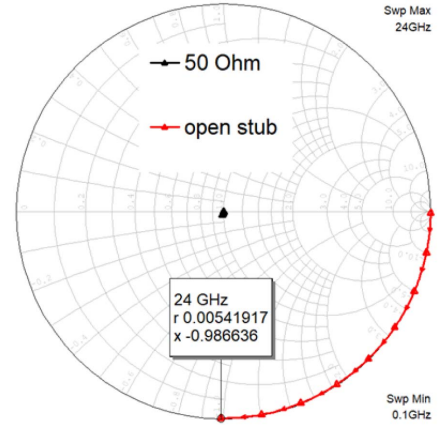


Fig. 6. Smith chart results simulated of 50Ω microstrip and λ/8-length open stub.

던스는 Fig. 6에서와 같이 저항(R)은 0이며 리액턴스(X)는 커패시턴스만 해당되며, $Z = jX_c$ 가 된다. 스미스차트의 임피던스는 50 Ω에 정규화 되어있으므로 이에 50을 곱하면 식 (2)와 같이 임피던스 값에서 커패시터 용량(C)을 계산할 수 있다.

$$50 \cdot X_c = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{j50\omega X_c} \quad (2)$$

2.3 인덕터 설계

인덕터의 기본 구조는 전선 간 short 되지 않게 라인이 감겨 있는 형태이며, 전류가 흐르면 발생하는 자기장의 형태로 에너지를 저장한다. 인덕터에 흐르는 전류가 증가하면 전류로 인해 발생하는 자속도 증가하는데, 자속에 대한 전류의 비례 상수가 인덕터 용량(L)이다. 본 논문에서는 층간 전선 패턴을 via로 연결하여 인덕터 기본 구조인 spiral 구조로 설계하였다. Fig. 7의 (a)은 spiral 2

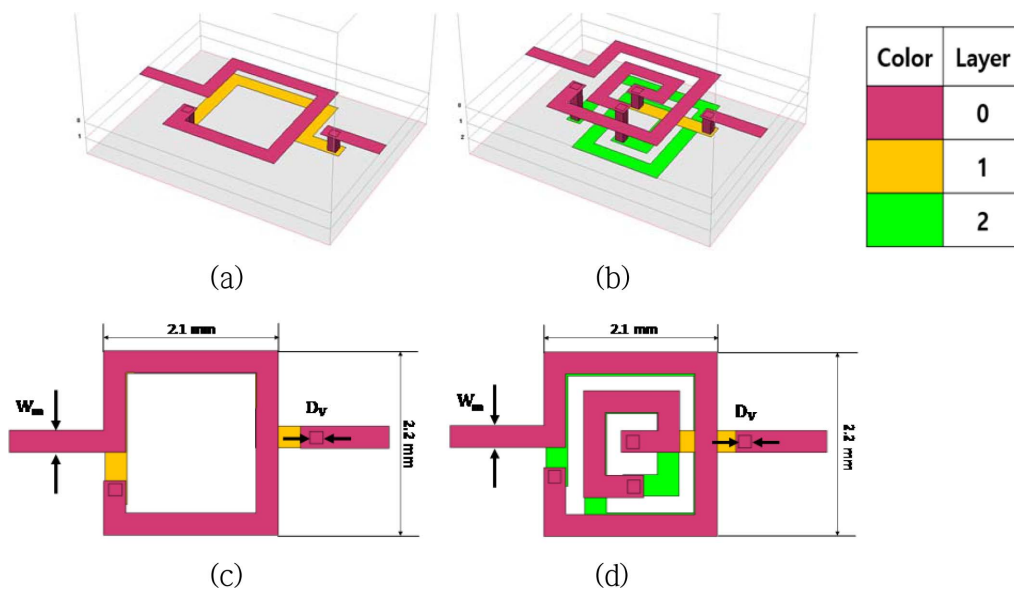


Fig. 7. Basic inductor structures. (a) 2-layer spiral structure design. (b) 3-layer spiral structure design. (c) Top view of 2-layer design. (d) Top view of 3-layer design.

층 디자인이며, 0층과 1층의 전선 패턴이 겹쳐 감겨 있는 형태이며, 시뮬레이션 결과 100 MHz에서 인덕터 용량이 5 nH이다. Fig. 7의 (b)인 3층 디자인은 2층 디자인에 비해 감겨 있는 부분이 더 많아 시뮬레이션 결과 100 MHz에서 10 nH으로 더 큰 인덕터 용량으로 설계되었다. Fig. 7의 (c)와 (d)를 보면 2층과 3층 디자인은 리드선을 제외한 인덕터 구현 영역이 2.1 mm × 2.2 mm로 동일하게 설계되었음을 알 수 있다. 커패시터와 마찬가지로 임피던스 50Ω인 마이크로스트립 선폭인 $W_m=260\ \mu\text{m}$ 으로 0층에 리드선을 형성하였다. via의 직경 D_v 은 150 μm 으로 설계하였으며, 시뮬레이션 편의상 원이 아닌 직사각형으로 모델링을 하였다.

Fig. 8은 spiral 구조로 설계된 인덕터 시뮬레이션 결과 데이터이며, 주파수대역에서 인덕터 용량 값을 보여준다. 2층 또는 3층 디자인 인덕터는 층간 패턴 사이에 커패시턴스가 발생하고 층간 패턴이 겹치는 부분이 많을수록 기생 성분으로 포함된 커패시턴스가 더 커진다. 이 때, 주파수가 높아지면 커패시턴스 성분이 크게 작용하여 SRF 주파수에서 용량값이 0이 되고, 이후 주파수에서는 반대 성분인 커패시터로 동작하게 된다. Fig. 8에서 보인 것처럼 100 MHz에서 용량 5 nH으로 설계된 인덕터의 SRF는 4.3 GHz이며, 용량 10 nH으로 설계된 인덕터의 SRF는 2.3 GHz이다. 설계된 인덕터의 용량이 커질수록 SRF는 낮아짐을 알 수 있다.

기본형인 spiral 구조의 인덕터는 SRF가 사용주파수인 24 GHz 보다 낮아 고주파 영역에서 사용하기에는 구조의 한계가 있다. 인덕터 사용 주파수 문제를 해결하기 위해 Fig. 9와 같이 $\lambda/8$ 길이 short stub 구조로 인덕터 설계를 고안하였다. 여기에서 stub의 선폭 W_m 은 50Ω 마이크로스트립 선폭인 260 μm 이며, $\lambda/8$ 길이인 L_m 은 7.5인 유전율과 150 μm 인 via 직경(= D_v)을 고려하여 750 μm 이다. Fig. 10에서 stub의 임피던스 시뮬레이션 결과를 볼 수 있다. 임피던스 결과에서 $\lambda/8$ 길이 short stub의 24 GHz에서 임피던스는 스미스차트 윗쪽 반원 외곽에 위치하며, 값은 j 이고 lossless 인덕터로 동작함을 알 수 있다.

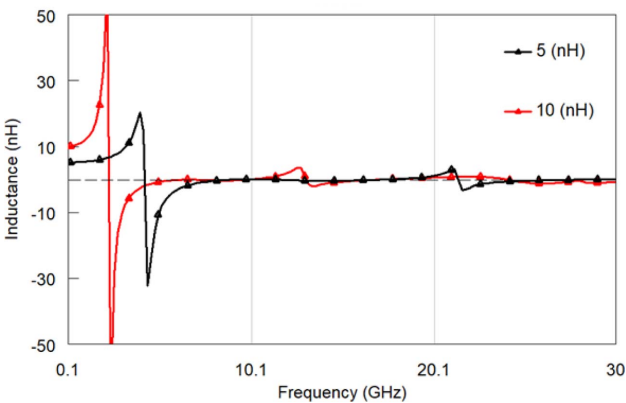


Fig. 8. Inductance result simulated according to frequency under designed 5 nH and 10 nH.

$\lambda/8$ 길이 short stub로 설계된 인덕터의 임피던스는 $Z = R + jX$ 에서 R 은 0이고, 리액턴스(X)는 인덕턴스만 존재하므로, $Z = jX_L$ 이다. 스미스차트의 임피던스는 50Ω에 정규화 되어있으므로 이에 50을 곱하면 식 (3)과 같이 임피던스 값에서 인덕터 용량(L)을 계산할 수 있다.

$$50 \cdot X_L = j\omega L \Rightarrow L = \frac{50 \cdot X_L}{j\omega} \quad (3)$$

2.4 수동소자 구현 및 측정 결과

본 논문에서 고안한 수동소자는 LTCC 공정 기술로 제작하였고, Fig. 11의 (a)와 같이 측정 장비를 구성하여 측정하였다. Fig. 11의 (b)에서 계측기인 벡터 네트워크 분

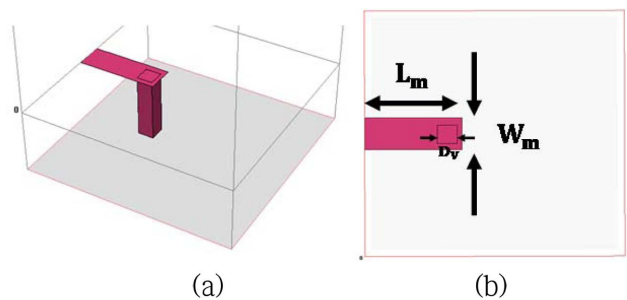


Fig. 9. $\lambda/8$ -length short stub structure. (a) Full view of $\lambda/8$ -length short stub. (b) Top view of $\lambda/8$ -length short stub.

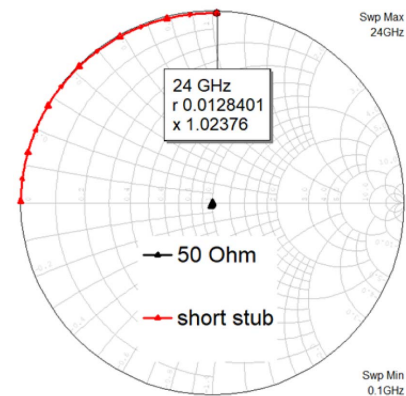


Fig. 10. Smith chart results simulated of 50Ω microstrip and $\lambda/8$ -line short stub.

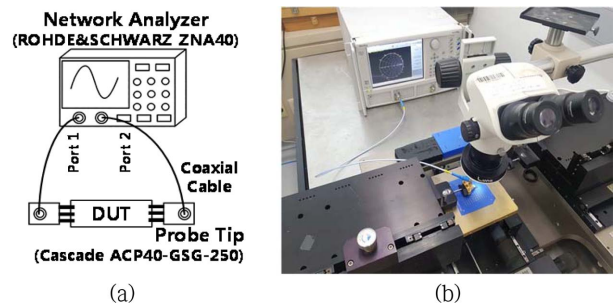


Fig. 11. Experimental setup. (a) Equipment configuration diagram. (b) A vector network analyzer connected with probe tips through coaxial cables.

석기(Vector Network Analyzer, VNA)의 port 1 또는 port 2에 동축케이블과 측정 시료에 프로빙하는 probe tip을 연결하였다. Probe tip과의 접촉을 위해 0층의 리드선 양단에 GSG (ground-signal-ground) 패턴을 적용하고, 접지 층과 패턴 연결을 위한 via의 직경을 150 μm 으로 제작하였다. GSG 패턴의 유무에 따른 시뮬레이션을 통해 결과가 동일함을 검증한 후, 패턴을 적용하여 시료를 제작하였다. De-embedding은 측정할 때, 신호 핀의 접촉 깊이를 고려하여 200 μm 로 설정하여 설계하였다.

VNA의 교정은 SLOT (short, load, open, through) 방식을 이용하였고, 시료를 측정하여 얻은 s1p 또는 s2p 형식의 데이터를 Origin S/W를 이용하여, 직각 좌표 또는 스미스 차트 형태로 plot하였다. 그래프의 해당 주파수 대역에서 용량 또는 임피던스 값을 기록 및 계산으로 값을 추출하여 수동소자 라이브러리를 구현하였다.

Fig. 12는 커패시터의 기본형인 전극 구조이며, 도면에서의 ($X_e \times Y_e$)를 달리하여 커패시터를 설계하였으며, 측

정을 통해 2.35 pF~30.44 pF 용량의 라이브러리를 구성하였다. Table 2에서 측정된 전극 구조 커패시터는 SRF가 사용 주파수인 24 GHz 보다 낮아 DC 영역에서만 사용할 수 있다. Fig. 14의 (a)는 전극 면적이 0.95 mm \times 0.9 mm인 기본 구조 커패시터의 주파수에 따른 커패시터 용량 측정치 그래프이며, 용량은 2.35 pF이다. 24 GHz에서 사용 가능한 Fig. 13과 같은 open stub 구조의 커패시터를 기판 두께와 선폭 (W_m)에 따라 제작하였다. Table 3과 같이 stub의 임피던스를 측정하여 커패시터 용량을 계산하였고, 0.44 pF~2.89 pF의 커패시터 라이브러리를 구축하였다. Fig. 14의 (b)는 open stub 구조 커패시터의 10 GHz~24 GHz에서 측정된 스미스차트이며, 빨간색으로 표시된 점인 24 GHz에서 정규화된 임피던스 $-j0.209\Omega$ 로 측정되었고, 계산식을 통하여 커패시터 용량 0.64 pF 값을 추출하였다.

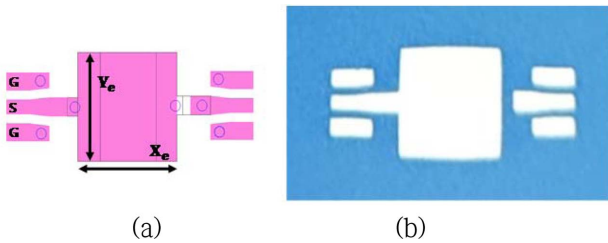


Fig. 12. A sample of basic capacitor structure applied LTCC substrate. (a) 2D CAD of capacitor with 4 electrodes. (b) A LTCC sample of capacitor with 4 electrodes.

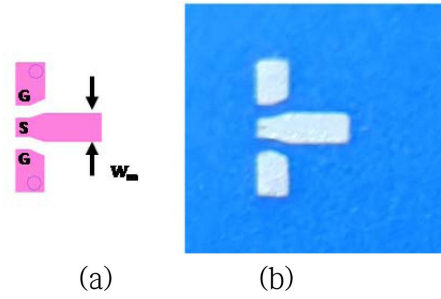


Fig. 13. A sample of $\lambda/8$ -line open stub structure applied LCP substrate. (a) 2D CAD of $\lambda/8$ -line open stub. (b) A LCP sample of $\lambda/8$ -line open stub.

Table 2. Capacitor library measured from basic structures (with 4 electrodes) for DC domain use.

Number of layers	Height of substrate	Area of electrode ($X_e \times Y_e$)	C (@ 100 MHz)	SRF
4	400 μm	0.95 mm \times 0.9 mm	2.35 pF	6.82 GHz
4	400 μm	1.5 mm \times 1.5 mm	5.79 pF	4.48 GHz
4	400 μm	2.3 mm \times 2.1 mm	13.38 pF	3.02 GHz
4	400 μm	3.3 mm \times 3.3 mm	30.44 pF	2.04 GHz

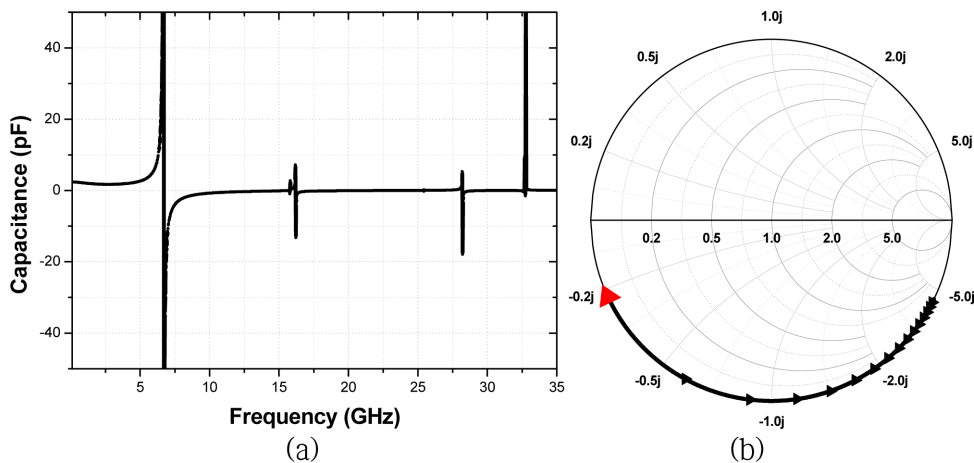


Fig. 14. Measurement data plotted of capacitors. (a) A basic capacitor structure of 2.35 pF (@100 MHz). (b) $\lambda/8$ -line open stub structure of 0.64 pF (@24 GHz) from $-j0.209\Omega$ normalized.

Table 3. Capacitor library measured from $\lambda/8$ -length open stub for high frequency domain use.

Height of substrate	Line width (W_m)	$X_c/50$ (Ω)	C (@ 24 GHz)
800 μm	150 μm	-0.302	0.44 pF
800 μm	260 μm	-0.215	0.62 pF
200 μm	150 μm	-0.209	0.64 pF
800 μm	300 μm	-0.143	0.93 pF
200 μm	260 μm	-0.068	1.95 pF
200 μm	300 μm	-0.046	2.89 pF

Fig. 15에서 인덕터의 기본형인 1, 2, 3층 spiral 구조의 도면과 샘플을 볼 수 있다. Table 4에 각각 인덕터 디자인에 따른 전선의 선폭 W_m , via를 포함한 전선의 총 경로 길이와 측정치를 표기되어 있다. spiral 구조의 인덕터 측정 결과 용량 0.75 nH~5.45 nH에 대한 라이브러리를 구축하였으며, 이는 SRF가 24 GHz 보다 낮아 DC 영역에서만 사용할 수 있다. Fig. 17의 (a)는 2층 디자인 기본 구조 인덕터의 주파수에 따른 인덕터 용량 측정치 그래프이며, 용량은 4.23 nH이다. 고주파 영역에서 사용 가능하도록 설계한 short stub 구조의 인덕터를 Fig. 16와 같이 기판 두께, 선폭 W_m 에 따라 제작하였다. stub의 임피던스를 측정하고, 인덕터 용량을 계산하였으며, Table 5와 같이 0.71 nH~1.56 nH 라이브러리를 구축하였다. Fig. 17의 (b)는 short stub 구조 인덕터의 10 GHz~24 GHz에서 측정한 스미스차트이며, 빨간색으로 표시된 점인

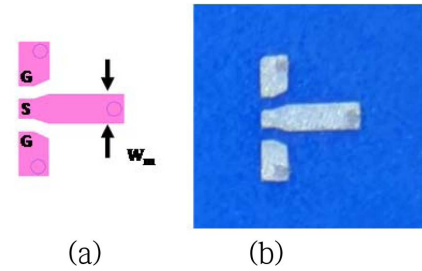


Fig. 16. A sample of $\lambda/8$ -line short stub structure applied LTCC substrate. (a) 2D CAD of $\lambda/8$ -line short stub. (b) A LTCC sample of $\lambda/8$ -line short stub.

Table 5. Inductor library measured from $\lambda/8$ -length short stub for high frequency domain use.

Height of substrate	Line width (W_m)	$X_L/50$ (Ω)	L (@ 24 GHz)
200 μm	600 μm	2.134	0.71 nH
200 μm	400 μm	3.146	1.04 nH
800 μm	600 μm	3.807	1.26 nH
200 μm	260 μm	4.205	1.39 nH
200 μm	150 μm	4.370	1.45 nH
800 μm	400 μm	4.704	1.56 nH

24 GHz에서 정규화된 임피던스 $j4.370\Omega$ 으로 측정되었고, 계산식을 통하여 인덕터 용량 1.45 nH 값을 추출하였다

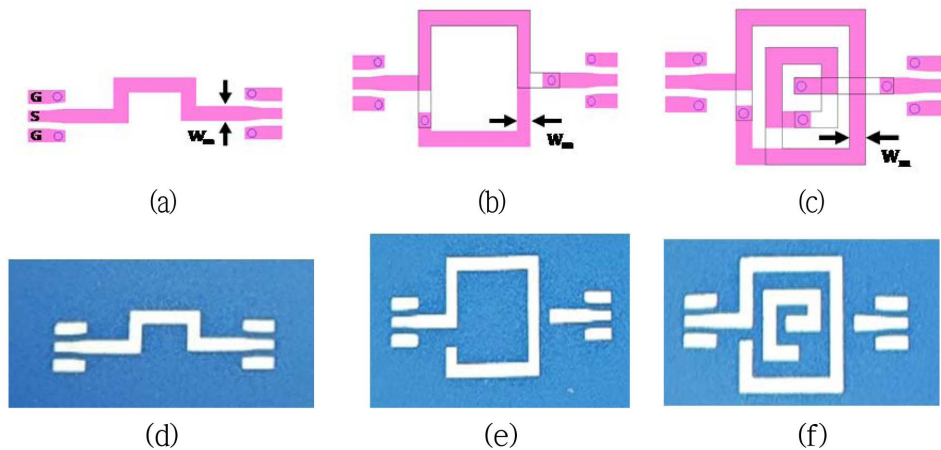


Fig. 15. A samples of basic inductor structures applied LTCC substrate. (a) 2D CAD of 1-layer design. (b) A LTCC sample of 1-layer design. (c) 2D CAD of 2-layer design. (d) A LTCC sample of 2-layer design. (e) 2D CAD of 3-layer design. (f) A LTCC sample of 3-layer design.

Table 4. Inductor library measured from basic structures (spiral) for DC domain use.

Number of layers	Height of substrate	Line length	Line width (W_m)	L (@ 100 MHz)	SRF
1	100 μm	4.01 mm	260 μm	0.75 nH	33.8 GHz
2	200 μm	8.73 mm	260 μm	2.61 nH	3.63 GHz
2	200 μm	14.43 mm	260 μm	4.23 nH	2.06 GHz
3	300 μm	22.35 mm	260 μm	5.45 nH	1.91 GHz

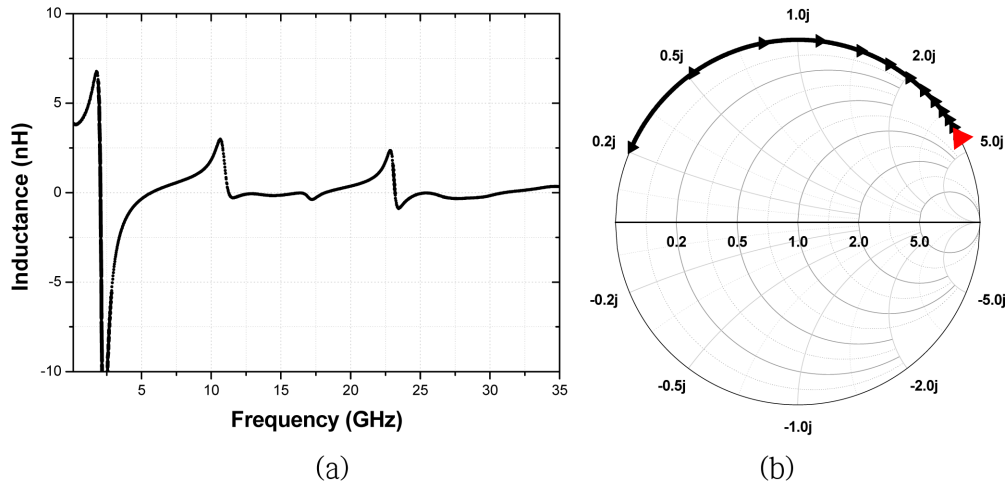


Fig. 17. Measurement data plotted of inductors. (a) A basic inductor structure of 4.23 nH (@100 MHz). (b) $\lambda/8$ -line short stub structure of 1.45 nH (@24 GHz) from $j4.370\Omega$ normalized.

3. 결 론

본 논문에서는 LTCC 기판을 적용한 수동소자를 구현하였고, DC 영역과 고주파 영역 사용으로 분류하였다. DC 영역 사용 커패시터와 인덕터의 구조는 전극형과 spiral이며, 이러한 기본 구조는 SRF가 24 GHz 보다 낮은 주파수에서 발생하여, 마이크로스트립 $\lambda/8$ 길이 stub 구조를 추가로 제안하여, 고주파 영역에서도 사용 가능한 수동소자를 설계하였다. 기본 구조인 DC영역 커패시터는 전극 면적이 넓을수록, 인덕터는 층간 겹치는 전선의 길이가 길수록 큰 용량 값을 얻을 수 있었다. 고주파용 커패시터인 $\lambda/8$ 길이 open stub는 선폭이 넓고 기판 높이가 얇으면 임피던스가 작아지므로 큰 용량 값을 얻을 수 있고, 고주파용 인덕터인 $\lambda/8$ 길이 short stub는 이와 반대로 선폭이 얇고 기판 높이가 두꺼우면 임피던스가 커지므로 큰 용량 값을 얻을 수 있다는 것을 검증하였다. 이러한 검증을 통해 LTCC 기판을 이용하여 다양하게 용량 값을 세분화하여 제작할 수 있으며, 1 pF~100 pF, 1 nH~20 nH 정도의 큰 용량을 갖는 기본 구조인 수동소자는 DC blocking, RF choke, bypass 등과 같이 DC 영역에서 사용될 수 있고, stub 구조인 고주파 영역 사용 수동소자는 임피던스 매칭을 위해 활용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 민·군기술협력사업의 일환인 “드론 Swarm 및 Auto Landing을 위한 50 g급 충돌방지 및 고도탐지용 극소전력 임펄스 레이더 센서 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 18-CM-SS-14).

References

1. Y. Lee, J. Ryu, D. Kim, J. Kim, J. Park and N. Kang, “Implementation of Front End Module for 2.4GHz WLAN Band(in Korean)”, J. Microelectron. Packag. Soc., 15(1), 19(2008).
2. A. Sutono, D. Heo, Y. E. Chen and J. Laskar, “High-Q LTCC-based passive library for wireless system-on-package (SOP) module development”, the IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 49(10), 1715(2001).
3. J. Lee, J. Ryu, S. Choi and J. Lee, “Implementation of Capacitor and Inductor Applied LCP Substrate for 35-GHz frequency band(in Korean)”, J. Microelectron. Packag. Soc., 27(4), 27(2020).
4. E. Hammerstad and O. Jensen, “Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design”, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 407(1980).