

기판상의 인덕터를 이용한 박막 공진 여파기의 대역 외 저지특성 개선 연구

A Study on the Out-of-Band Rejection Improvement of TFBAR Ladder Filter using On-Wafer Inductors

김 종 수 · 구 명 권* · 육 종 관

Jong-Soo Kim · Myeong-Gweon Gu* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 기판상의 인덕터가 박막공진 여파기의 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 두 종류의 사다리형 박막공진 여파기를 설계 및 제작하였다. 여파기를 이루고 있는 박막공진기들의 압전물질은 AlN이고, 전극은 백금(Pt)으로 이루어졌으며 기판에 의한 오버모드(overmode) 현상을 제거하기 위하여 air-gap 형태로 제작되었다. 듀플렉서를 이루고 있는 송신용 여파기의 특성을 보이기 위해 4개의 직렬 공진기와 2개의 병렬 공진기로 이루어진 사다리형 4/2단 여파기가 제작되었으며, 수신용 여파기의 성능을 보이기 위해서는 3/4단으로 제작되었다. 여파기의 성능을 개선하기 위해 사용된 기판상의 인덕터들은 2 GHz 대역에서 약 5~9 정도의 Q 값 특성을 보였으며, 인덕터가 연결된 여파기는 연결되지 않은 경우에 비해 약 10~12 dB 정도의 개선된 대역외 저지특성을 보였다.

Abstract

In this paper, two types of thin film bulk acoustic resonator(TFBAR) ladder filters are designed and fabricated to analyze the effects of on-wafer inductor integration. To suppress the overmode phenomenon a 1 μ m thick air-gap is fabricated under the TFBAR and aluminum nitride is used for piezoelectric material, while platinum is employed for the top and bottom electrodes. The Tx filter in a duplexer, which usually has a steeper skirt characteristics on the right side of the passband, is designed with four serial and two shunt resonators, namely, a 4/2 stage. Similarly, the Rx filter is devised with a 3/4 stage to create a mirrored image of the Tx filter passband characteristics. Fabricated on-wafer spiral inductors with underpass reveals the Q factor of 5~9 at 2 GHz. Inductor integrated filters have approximately 10 to 12 dB out-of-band rejection improvement, when compared to the original filters.

Key words : TFBAR, Ladder Filter, On-wafer Inductor, Out-of-Band Rejection

I. 서 론

최근 들어 표면 미세 가공 기술(surface micromachining technology)의 현저한 발달로 인하여 다양한 초고주파용 소자들을 보다 작은 크기로 구현하는 것이 가능해졌다. 그 결과 RF 단말기에 있어서 중요한

부품 중 하나인 대역통과 여파기 역시 실리콘 기판 위에 집적시키기 위하여 점차 소형화되고 있는 추세이다. 대부분의 단말기에 사용되고 있는 여파기는 세라믹 공진기를 이용한 것이나 SAW(surface acoustic wave) 기술을 이용한 것이 주류를 이루고 있었다. 하지만 이런 여파기들은 비교적 큰 부피와 동작 주

연세대학교 전기전자공학과(Dep. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*(주)엠에스 솔루션(MEMS Solution Inc.)

· 논문 번호 : 20031120-166

· 수정완료일자 : 2004년 2월 2일

파수 영역의 한계, 고전력에 대한 불안전성 등으로 인하여 on-chip 시스템으로 가는데 어려움을 겪고 있다^{[1],[2]}. 근래에 들어 제안된 박막공진기(TFBAR)를 이용한 여파기는 이러한 단점들을 극복할 수 있고, 실리콘 기관 위에서 보다 작은 크기에 높은 Q 값을 가지도록 구현이 가능하기 때문에 기존의 여파기를 대체하고 동시에 on-chip 시스템으로 가는 해결책이 될 수 있다^{[2],[3]}.

박막공진기는 AlN, ZnO, PZT와 같은 얇은 막의 압전물질을 두 개의 전극 사이에 위치시켜 제작되며, 최근의 연구들에 의하여 AlN와 ZnO를 이용한 박막공진 여파기가 1~2 GHz 대역의 이동통신용 여파기로써 적합하다고 알려져 있다^{[4],[5]}. 하지만 ZnO의 경우 전기적 저항과 항복 전압이 낮고, 유전체 손실이 크다는 단점이 있기 때문에^[6] 본 논문에서는 AlN를 이용하여 박막공진기를 제작하였다.

박막공진기의 공진 주파수는 다양한 구조적, 물질적 변수들에 의해 결정되지만 그 중에서도 압전물질과 전극으로 이루어진 전체 두께가 가장 큰 영향을 미친다. 본 논문에서 제작된 사다리(ladder)형 구조의 여파기는 병렬단의 공진기가 직렬단의 공진기에 비해 약 2~3% 정도 낮은 공진 주파수를 갖도록 설계되었는데, 이는 공정상의 편의를 위해 주로 위쪽 전극의 두께를 조절함으로써 얻어질 수 있다.

1990년대 초반에 Vale^[7]은 GHz 대역에서 동작하는 박막공진 여파기의 구현 가능성과 외부의 인덕터, 캐패시터를 이용하는 튜닝 방법을 제시하였으며, 2000년대 초반에 Ruby^[5]는 박막공진기만으로 여파기를 구현한 뒤 패키징을 한 후, PCB 상에서 전송선로 형태의 인덕터를 이용하여 여파기의 성능을 개선하는 방법을 제안하였다. 즉, 지금까지의 박막공진 여파기에 대한 성능 개선 방법은 외부의 칩 소자나 전송선로 형태의 인덕터를 이용하는 것이 대부분이었기 때문에 본 논문에서는 박막공진기를 제작한 기관 위에 나선형 인덕터를 함께 제작함으로써 기관 위의 내부 인덕터에 의한 성능 개선 효과를 알아보았다. 이러한 효과를 비교, 분석하기 위하여 듀플렉서의 송신용 여파기와 수신용 여파기를 각각 제작하였으며, 각 여파기의 특성을 개선시킬 수 있도록 다른 방법으로 인덕터를 연결하였다.

II. 박막공진 여파기와 인덕터의 설계

박막공진기를 이용하여 여파기를 설계하는 방법에는 크게 사다리형, 격자형, 밸런스형 등의 방법이 있다. 이 중, 사다리형은 다른 방법들에 비해 공진기의 개수가 적게 들어간다는 장점으로 인해 가장 널리 사용되는 방법이다. 사다리형 박막공진 여파기의 한 단은 직렬공진기와 병렬공진기의 한 쌍으로 이루어지며, 앞서 언급한대로 병렬공진기의 공진주파수는 직렬공진기보다 약 2~3% 낮도록 설계되는데 이러한 공진주파수의 차이로 인해 여파기의 통과대역이 결정된다. 이 때, 병렬공진기의 반공진주파수와 직렬공진기의 공진주파수가 같도록 설계하면 그림 1에 보이는 것처럼 직렬공진기와 병렬공진기의 주파수 응답이 합쳐지면서 그림 2와 같은 여파기 특성을 갖추게 된다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 사다리형 여파기의 삽입손실은 정확히 병렬공진기의 공진주파수와 직렬공진기의 반공진주파수에서 감쇄극(attenuation pole) 특성을 보이게 되며, 병렬공진기의 반공진주파수와 직렬공진기의 공진주파수를 전후하여 여파기의 통과대역을 형성하게 된다.

단일 박막공진기의 경우 공진주파수에서는 거의 0에 가까운 임피던스 특성을 보이고, 반대로 반공진주파수에서는 매우 높은 임피던스 특성을 보이기 때문에 주파수가 올라감에 따라 먼저 병렬공진기의 공진주파수에 도달하게 되어 입력신호의 대부분이 임피던스가 작은 병렬공진기를 통해 접지 쪽으로 빠져

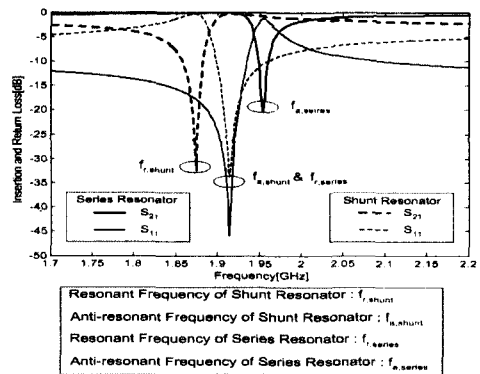


그림 1. 사다리형 여파기 설계를 위한 공진주파수 분배

Fig. 1. Resonant frequency alignment for design of ladder filter.

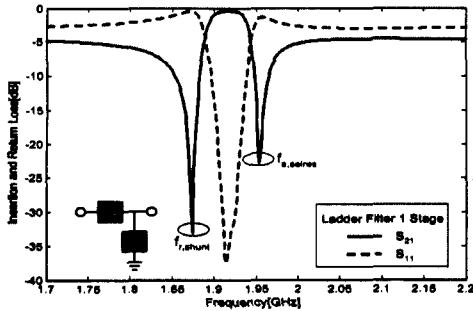
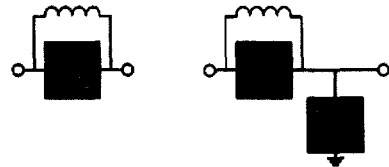


그림 2. 사다리형 여파기 1/1단 주파수 응답
Fig. 2. Frequency response of ladder filter 1/1 stage.

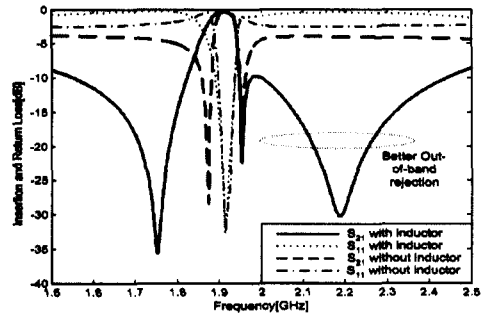
나그림 2와 같이 통과대역 좌측에서 날카로운 감쇄극 특성을 보이게 된다. 병렬 공진기의 반공진 주파수와 직렬공진기의 공진주파수에 도달하면 상대적으로 임피던스가 작은 직렬공진기 쪽으로 신호의 대부분이 흐르기 때문에 통과대역을 형성하게 되고, 직렬공진기의 반공진주파수에 도달하면 직렬공진기의 매우 큰 임피던스로 인해 대부분의 신호가 상대적으로 임피던스가 작은 병렬공진기 쪽으로 흐르게 되어 통과대역 우측의 감쇄극 특성을 보이게 된다. 사다리형 여파기의 단수는 주어진 스펙을 만족시킬 수 있도록 결정되며, 단수가 증가할수록 대역 외 저지특성은 좋아지고 통과대역 내의 삽입손실 특성은 저하된다는 연구결과가 있다^[4].

본 논문에서는 사다리형 박막공진 여파기의 대역 외 저지특성을 개선하기 위하여 기판상의 인덕터를 이용하는 방법을 제안하였다. 그림 3(b)는 사다리형 여파기 1/1단의 병렬공진기에 직렬로 인덕터를 연결한 경우의 주파수 응답이다. 이 경우 연결된 인덕터에 의해 유도되는 추가적인 반공진주파수의 영향으로 통과대역 우측에서 개선된 대역 외 저지특성을 얻을 수 있다. 비슷한 방법으로 직렬공진기에 병렬로 인덕터를 연결한 경우는 그림 3(c)에 보이는 것처럼 통과대역 좌측에서 개선된 특성을 얻을 수 있다. 이런 방법들을 이용하여 듀플렉서를 이루는 송신 및 수신용 여파기를 설계할 수 있다.

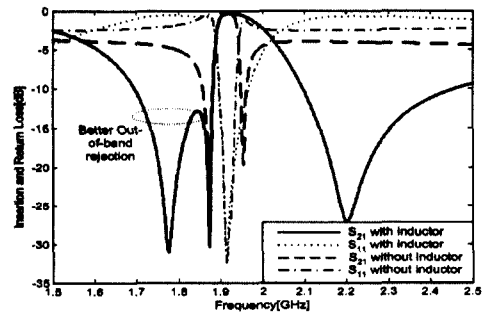
그림 4는 사다리형 필터의 대역 외 저지특성을 개선하기 위해 제작된 기판상의 나선형 인덕터의 수직구조와 제작된 사진이다. 제작된 인덕터는 2 μm 두께의 금으로 이루어졌으며 라인의 너비는 30 μm, 라인과 라인 사이의 간격은 10 μm로 제작되었다. 인



(a) 구현방법
(a) Topology



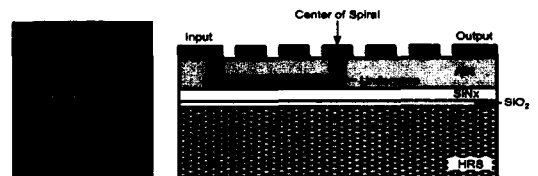
(b) 병렬공진기에 직렬로 인덕터를 연결한 경우
(b) Inductor in series to shunt TFBAR



(c) 직렬공진기에 병렬로 인덕터를 연결한 경우
(c) Inductor in parallel to serial TFBAR

그림 3. 사다리형 1/1단 여파기에 인덕터가 연결된 주파수 응답

Fig. 3. Frequency response of ladder filter 1/1 stage with inductor.



(a) 사진
(a) Photograph
(b) 수직구조
(b) Cross-sectional geometry

그림 4. 제작된 인덕터 구조
Fig. 4. Geometry of fabricated inductor.

덕터 중심부와 입력 패드를 연결하기 위해 0.5 μm

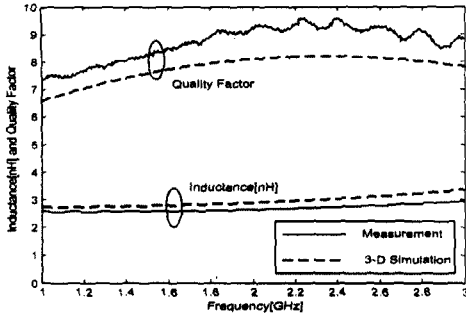


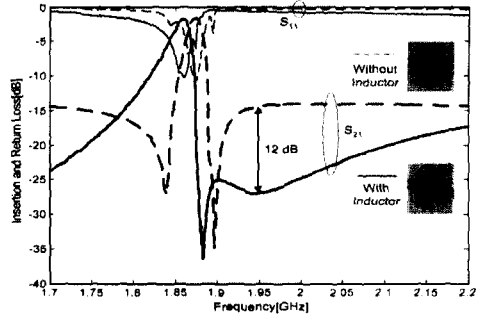
그림 5. 제작된 인덕터의 인덕턴스와 Q 값
Fig. 5. Inductance and Q value of fabricated inductor.

두께의 금으로 제작된 물린 형태의 언더패스(underpass)를 사용하였다. 인덕터의 특성을 예측하기 위하여 3차원 EM 모의실험을 수행하였으며, 그림 5에 주어진 것처럼 2.87 nH로 설계된 인덕터의 측정치는 2.65 nH로써 약 6% 정도의 오차가 발생하였으며, 이는 신호 입, 출력 패드의 영향을 충분히 고려하지 못하였기 때문으로 분석된다. 2 GHz 대역에서의 Q 값은 약 9 정도를 보였다.

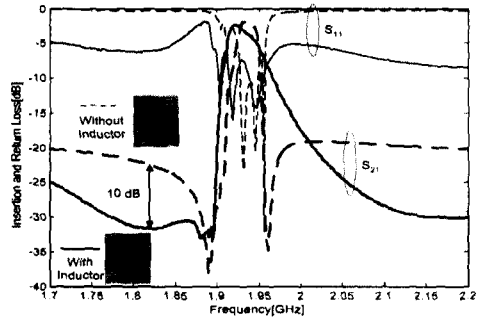
III. 측정 결과 및 분석

본 논문에서는 기판상의 인덕터에 의한 박막공진 여파기의 성능 개선 효과를 고찰하기 위하여 두 종류의 여파기를 설계 및 제작하였다. 송신용 여파기의 경우는 4개의 직렬공진기와 2개의 병렬공진기로 이루어진 4/2단 형태이고, 통과대역 우측에서의 대역 외 저지특성을 개선하기 위하여 그림 3(b)에 보인 것과 같이 2개의 병렬공진기에 직렬로 인덕터를 연결하였다. 수신용 여파기는 송신용 여파기와는 반대로 통과대역 좌측에서의 특성을 강화하기 위하여 3/4단 구조로 설계한 뒤, 3개의 직렬공진기에 병렬로 인덕터를 연결하였다. 그림 6은 이들에 대한 측정결과로서 인덕터가 연결된 여파기는 연결되지 않은 여파기에 비해 원하는 한쪽 대역에서 약 10~12 dB 정도의 개선된 대역 외 저지특성을 얻을 수 있었다. 따라서, 기판상의 인덕터를 이용하는 방법이 이미 상용되고 있는 것보다 작은 크기의 듀플렉서를 구현할 수 있으며, 동시에 on-chip 시스템으로 가는 해결책이 될 수 있다는 가능성을 보여준다.

하지만, 그림 6의 측정결과는 모의실험을 통해 예



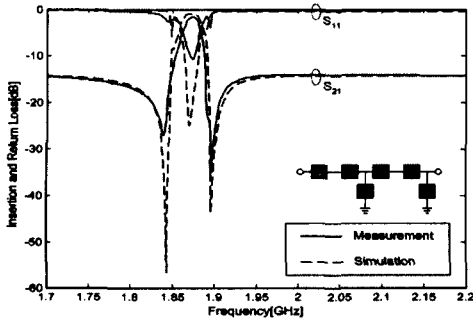
(a) 송신용 여파기
(a) Tx filter



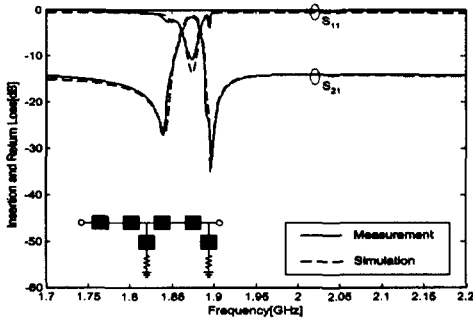
(b) 수신용 여파기
(b) Rx filter

그림 6. 제작된 여파기 측정 결과
Fig. 6. Measured result of fabricated filters.

측된 개선 효과에 미치지 못하는 특성을 보였다. 이런 원인을 분석하기 위하여 다음과 같이 두 가지 경우로 나누어서 고찰해 보았다. 첫 번째는 인덕터가 연결되지 않은 여파기 자체의 특성에 대한 분석이고, 두 번째는 대역 외 저지특성을 개선하기 위하여 연결된 기판상의 인덕터에 의한 영향 분석이다. 먼저, 인덕터가 연결되지 않은 박막공진기만으로 구성된 여파기의 성능 열화 원인을 분석하기 위하여 그림 7과 같은 모의실험을 수행하였다. 그림 7(a)는 송신용 여파기로 설계된 4/2단 여파기의 모의실험 결과와 측정결과를 겹쳐서 그린 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 통과대역 좌, 우의 감쇄극에서 많은 차이가 발생함을 알 수 있다. 이에 대한 원인으로서는 두 가지 가정을 할 수 있는데, 그 이유의 첫 번째는 여파기를 이루고 있는 공진기들의 공진주파수가 일정하지 않다는 것이고, 두 번째는 기판상에서의 측정을 위해 제작된 CPW 구조의 그라운드가 회로 모의 실험에서 사용한 이상적인 그라운드와는 다른 특성



(a) 분석 전 결과
(a) Primary result



(b) 분석된 결과
(b) Analyzed result

그림 7. 인덕터가 연결되지 않은 4/2단 여파기의 모의실험 결과와 측정결과
Fig. 7. Simulated and measured results of original 4/2 stage filter without inductors.

을 보일 것이라는 가정이다. 이를 확인하기 위하여 그림 7(b)와 같이, 회로 모의실험을 하는데 있어서 이상적인 그라운드에 저항을 연결하고, 여파기를 이루고 있는 공진기들의 공진주파수를 설계치로부터 10 MHz 범위 내에서 각각 다른 값들을 사용하여 보았다. 이러한 모의실험을 수행한 결과 모의실험 결과가 실제 측정된 결과와 비슷해지는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 수신용 여파기로 설계된 3/4단 여파기의 경우에서도 발견할 수 있었다. 이를 통해, 인덕터가 연결되지 않은 박막공진기만으로 제작된 여파기의 성능 열화 원인으로서는 정확한 두께 공정이 수행되지 않아서 각 공진기의 공진주파수가 조금씩 다르다는 점과 측정을 위한 접지면이 불완전하다는 점을 들 수 있다.

제작된 여파기의 두 번째 특성 열화 원인인 인덕터에 의한 영향도 인덕턴스와 Q 값의 두 가지 측면

에서 고찰하여 보았다. MBVD^[8] 모델의 관점에서 보면 단일 박막공진기의 공진주파수와 반공진주파수는 그림 8(a)에 보인 것과 같이 세 개의 수동소자에 의해 결정된다. 따라서 그림 3(a)에 보인 경우는 그림 8(b)와 (c)처럼 증가화시킬 수 있다. 이 경우 입력 임피던스 특성에 의하여 새롭게 유도되는 반공진주파수를 구해보면 다음과 같다.

$$\omega_{a,induced}^2 = \frac{p \pm \sqrt{p^2 - 4q}}{2q} \quad (1)$$

여기서 $p = L_1 C_1 + L_1 C_0 + L_1 C_2$, $q = L_1 L_2 C_0 C_1$ 그리고 L_1 는 박막공진기에 연결된 인덕터의 인덕턴스이다. 식 (1)을 통해 확인할 수 있는 것은 박막공진기에 연결된 인덕터의 인덕턴스가 설계치와 일치하지 않는 경우 유도되는 반공진주파수의 위치가 달라지기 때문에 원하는 결과를 얻을 수 없다는 사실이다. 이를 통해 연결되는 인덕터의 부정확한 인덕턴스 값이 여파기의 성능을 열화시키는 또 다른 원인으로 작용한다고 볼 수 있다.

인덕터의 Q 값에 의한 영향을 고찰하기 위해서는 다음과 같은 가정을 하였다. 그림 9(a)는 가장 널리 쓰이는 기판상의 나선형 인덕터에 대한 등가모델이다. 이 모델이 아무리 복잡한 형태로 주어진다 할지라도 입력임피던스는 $R(\omega) + jX(\omega)$ 의 형태로 구해질 것이다. 따라서 Q 값에 의한 영향을 쉽게 알아보기 위하여 그림 9(b)와 같은 형태의 단순화된 인덕터 모

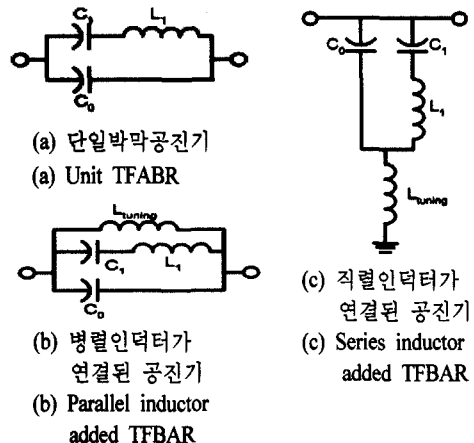
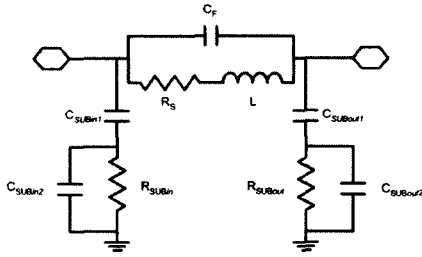


그림 8. 반공진주파수 계산을 위한 회로도
Fig. 8. Schematics for calculation of induced anti-resonant frequency.



(a) 기존모델
(a) Conventional model



(b) 단순화된 모델
(b) Simplified model

그림 9. 인덕터 등가모델

Fig. 9. Equivalent circuit of inductor.

델을 가정하고, R 값을 조절함으로써 모의실험을 해 보았다.

그림 10은 인덕터 Q 값에 의한 영향을 분석한 그래프로써 굵은 실선 그래프는 단일 박막공진기에 기판상의 인덕터가 연결된 측정결과이다. 박막공진기의 측정결과에 이상적인 인덕터를 연결하여 모의실험한 경우는 이상적인 인덕터의 높은 Q 값으로 인하여 유도된 반공진주파수에서 날카로운 특성을 보이는 반면, 그림 9(b)의 등가회로를 이용하여 모의실험한 경우는 실제 측정된 결과와 비슷한 양상을 보였다. 즉, 이상적인 인덕터에 저항을 연결함으로써 실제 제작된 인덕터의 Q 값 수준으로 떨어뜨렸더니 측정된 그래프와 비슷한 결과를 보였다. 이를 통해 제작된 인덕터의 낮은 Q 값이 여파기의 성능을 열화시키는 또 하나의 원인으로 작용했음을 알 수 있다.

이상의 분석된 결과를 바탕으로 기판상의 인덕터를 이용하여 여파기의 성능을 개선하는 최적화된 방법을 다음과 같이 기술할 수 있다. 먼저 그림 3에 소개된 구현 방법과 반공진주파수를 계산할 수 있는 식 (1)을 통하여 여파기의 성능을 강화시킬 수 있는 적절한 인덕턴스 값을 결정한다. 다음으로 그림 11에 주어진 것과 같이 그림 9(b)의 단순화된 인덕터 모델을 이용하여 대역 외 저지특성을 개선할 수 있는 인덕터 Q 값의 임계치를 결정한다. 마지막으로 충분한 3차원 EM 모의실험을 통하여 계산된 인덕턴스와 Q 값을 만족하는 나선형 인덕터의 구조를 결정

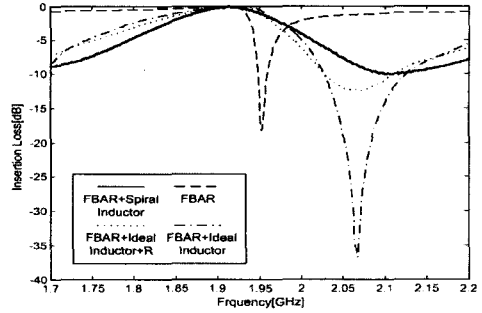


그림 10. 인덕터 Q 값에 의한 영향을 분석하기 위한 주파수 응답

Fig. 10. Frequency response for analyzing the effects of inductor Q value.

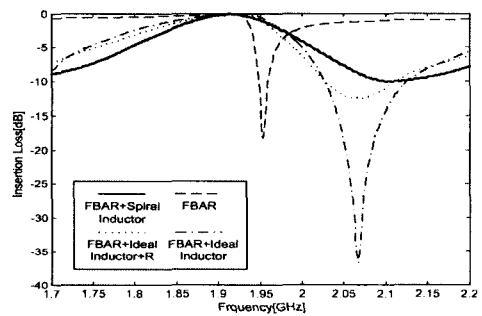


그림 11. 단순화된 인덕터 등가회로의 Q 값 그래프

Fig. 11. Q value graph of simplified inductor equivalent circuit.

한 뒤 실제 제작에 들어간다.

IV. 결 론

본 논문에서는 박막공진 여파기의 대역 외 저지특성을 개선하는 방법으로 기판상의 인덕터를 이용하는 것을 제안하였으며, 이에 따른 영향을 분석하였다. 박막공진기를 이루고 있는 압전물질은 AlN를 사용하였고, 두 개의 전극은 백금(Pt)으로 제작되었다. 제작된 기판상의 인덕터는 등근 형태의 나선형으로써 2 GHz 대역에서 약 9 정도의 Q 값 특성을 보였다. 인덕터가 연결된 송신 및 수신용 여파기는 연결되지 않은 경우에 비해 약 10~12 dB 정도의 개선된 대역 외 저지특성을 보임으로써 기판상의 인덕터를 이용하는 방법이 상용 듀플렉서보다 작은 크기로 구현함과 동시에 on-chip 시스템으로 가는 해결책이 될 수 있다는 가능성을 보였다. 하지만 정확한 두께

공정을 통하여 여파기를 구성하고 있는 박막공진기들의 공진주파수를 일정하게 조절하는 것과 보다 높은 Q 값을 가지는 인덕터를 개발하는 것이 향후 수행되어야 할 과제로 남아 있다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. Rosenbaum, *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*, Artech House, Norwood, 1998.

[2] R. S. Naik, J. J. Lutsky, R. Rief and C. G. Sodini, "Electromechanical materials using a bulk acoustic wave resonator", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 45, no. 1, pp. 257-263, Jan. 1998.

[3] K. W. Kim, J. G. Yook, M. G. Gu, W. Y. Song, Y. J. Yoon and H. K. Park, "TFBAR filters for 2 GHz wireless applications", *2002 IEEE MTT-S Digest*, vol. 2, pp. 1181-1184, 2002.

[4] K. M. Lakin III, "Modeling of thin film resonator and filters", *1992 IEEE MTT-S Digest.*, vol. 1, pp. 149-152, 1992.

[5] P. D. Bradley, R. C. Ruby, J. D. Larson III, Y. Oshmyansky and D. Figueredo, "A film bulk acoustic resonator (FBAR) duplexer for USPCS handset applications", *2001 IEEE MTT-S Digest*, vol. 1, pp. 367-370, 2001.

[6] Q. X. Su, P. Kirby, E. Komuro, A. Imura, Q. Zhang and R. Whatmore, "Thin-film bulk acoustic resonators and filters using ZnO and Lead-Zirconium-Titanate thin films", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 4, pp. 769-778, Apr. 2001.

[7] C. Vale, J. Rosenbaum, S. Horwitz, S. Krishnaswamy and R. Moore, "FBAR filters at GHz frequencies", *IEEE Symposium on Frequency Control*, vol. 1, pp. 332-336, 1990.

[8] J. D. Larson III, P. D. Bradley, S. Wartenberg and R. C. Ruby, "Modified Butterworth-Van Dyke Circuit for FBAR resonators and automated measurement system", *2000 IEEE Ultrasonics Symposium Digest*, vol. 1, pp. 863-868, 2000.

[9] K. W. Kim, J. G. Yook and H. K. Park, "CAD Model Analysis of the Air-gap Type TFBAR", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 5, pp. 384-385, Sep. 2002.

김 종 수



2002년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
 2002년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 박막공진기 및 초고주파 회로설계

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 2월: University of Michigan (공학박사)
 2000년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수
 [주 관심분야] FDTD, MMIC, RF MEMS

구 명 권



1986년 2월: 한양대학교 재료공학과 (공학사)
 1989년 2월: 연세대학교 금속공학과 (공학석사)
 현재: (주)엠에스 솔루션 대표
 [주 관심분야] 박막공진기