

박막공진 여파기에 대한 기판위에서의 튜닝

°김 중 수, 김 건 옥, 구 명 권*, 육 중 관, 박 한 규
연세대학교, (주)엠에스 솔루션*

E-mail : jongsookim@yonsei.ac.kr

On-wafer Tuning of the TFBAR Ladder Filters

°Jong-Soo Kim, Kun-Wook Kim, Myeong-Gweon Gu*, Jong-Gwan Yook, Hna-Kyu Park
Yonsei University, MEMS Solutions Inc*.

Abstract

In this paper, Thin film bulk acoustic resonator(TFBAR) filters tuned by gold plated on-wafer inductors are presented. The air-gap type TFBAR is used with aluminum nitride(AIN) as piezoelectric material and platinum as top and bottom electrodes. Inductor equivalent model and modified Butterworth-Van Dyke(MBVD) model are employed for the frequency tuning of fabricated TFBAR bandpass filters. Fabricated inductor has inductance of 3 nH and Q factor of about 8 at 2 GHz. It is clearly revealed that inductor tuning can enhance the bandwidth of ladder filters and improve out-of-band rejection characteristic around 10 dB.

Key words : AIN, Ladder filter, On-wafer inductor tuned, TFBAR

I. 서 론

최근의 이동통신 시장에 있어서 통신용 단말기는 시장을 주도하고 있는 중요한 분야이다. 이동통신 서비스는 사용자들의 다양한 요구에 부합하고자 계속하여 새로운 서비스를 제공하고 있으며, 이에 따라 이동통신용 단말기는 점차 다양화, 소형화 되어 가고 있는 추세이다. 공정기술의 비약적인 발전으로 인해 단말기의 소형화 및 집적화가 가능해지면서 대부분의 통신용 단말기에 채널 선택용 또는 영상 제거용으로 한 개 이상 사용되고 있는 여파기 역시 점차 소형화 되어가고 있다. 대부분의 낮은 GHz 대역에서 동작하고 있는 단말기에는 세라믹 공진기를 이용한 여파기와 Surface Acoustic Wave(SAW) 기술을 이용한 여파기가 사용되고 있는데, 이런 여파기들은 on-chip 시스템으로 가기위한 소형화에 어려움을 겪고 있으며, 고전력에 대한 불안정함과 동작 주파수 영역의 한계라는 단점을 가지고 있다 [1]-[2]. 근래에 들어 이러한 문제점을 해결하고자 박막공진

기(Thin Film Bulk Acoustic Resonator ; TFBAR)를 이용한 여파기가 대안으로 제시되었다. 박막공진 여파기는 실리콘 기판위에 직접 제작이 가능하기 때문에 단말기 내의 다른 능동소자들과의 집적이 가능하여 on-chip 시스템으로 가는 해결책이 될 수 있다 [2]-[3].

박막공진기는 AIN, ZnO, PZT와 같은 얇은 막의 압전물질을 두 개의 전극 사이에 위치시켜 제작되며, 최근의 연구들에 의하여 AIN와 ZnO를 이용한 박막공진 여파기가 1~2 GHz 대역의 이동통신용 여파기로써 적합하다는 결론이 얻어졌다[4]-[5]. 박막공진기의 공진 주파수는 다양한 구조적, 물질적 변수들에 의해 결정되지만 그 중에서도 압전물질과 전극으로 이루어진 전체 두께가 가장 큰 영향을 미친다. 본 논문에서 제작된 사다리형 구조의 여파기는 병렬단의 공진기가 직렬단의 공진기에 비해 약 2~3 % 정도 낮은 공진 주파수를 갖도록 설계되어야 하는데, 이는 공정상의 편의를 위해 주로 위쪽 전극의 두께를 조절함으로써 얻어질 수 있다.

1990년대 초반에 J. Rosenbaum과 S. Horwitz [6]는 GHz 대역에서 동작하는 박막공진 여파기의 가능성과 외부의 인덕터, 캐패시터를 이용하는 튜닝 방법을 제시하였으며, 1990년대 후반에는 정교한 MEMS 공정의 등장으로 박막공진기의 제작이 매우 용이해짐에 따라 압전물질의 선택이나 전극의 두께 및 여파기 구조에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되었다. 이때까지 박막공진 여파기에 대한 튜닝 방법은 외부의 chip 소자나 전송선로를 이용하는 것이 대부분이었으므로 본 논문에서는 박막공진기를 제작한 기판 위에 인덕터를 함께 제작하여 기판위의 내부 인덕터에 의한 튜닝 효과를 알아보기 위해 튜닝된 여파기와 튜닝되지 않은 여파기를 비교, 분석하였다.

II. 본 론

2-1 박막공진기의 모델링

사다리형 구조의 여파기를 설계하기 위해서는 박막공진기에 대한 등가모델이 필요하다. 박막공진기에 대한 해석은 주로 일차원적 해석이 많이 이루어졌으며 최근에 들어 FDTD 혹은 FEM 등의 전자파 해석을 도입하고 있다. 하지만 전극의 두께가 무시할 수 있을 정도로 얇다는 가정을 하면 그림 1처럼 수동소자들만으로 이루어진 단순한 구조의 Modified Butterworth-Van Dyke(MBVD) 모델로 표현할 수 있다.

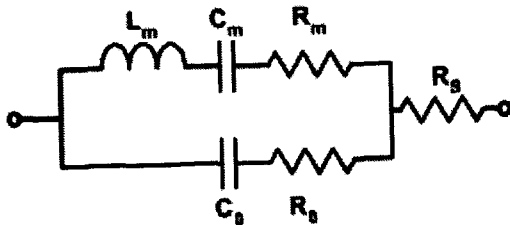


그림 1. MBVD 모델

MBVD 모델을 이용한 박막공진기의 등가모델에서 각 수동소자들의 값은 측정된 박막공진기의 주파수 응답으로부터 추출해 낼 수 있다. Electromechanical 결합상수 k_t^2 과 공진점에서의 선택도 인자 Q는 측정값과 모델링값을 이용하여 식 (1)을 통해 구할 수 있으며, 본 논문에서 제작된 박막공진기의 경우 k_t^2

은 약 4.9%, Q는 공진점에서 약 950 정도의 값을 가진다.

$$k_t^2 = \frac{\pi^2 f_a - f_r}{f_a}, \quad Q = \frac{2\pi f_r L_m}{R_m} \quad (1)$$

이 때, f_r 은 공진주파수, f_a 는 반공진주파수이며 L_m 과 R_m 은 등가모델의 기계적 가치를 이루는 부분의 기계적 자기용량과 저항을 나타낸다.

2-2 인덕터의 모델링

본 논문에서는 박막공진 여파기의 대역의 저지특성을 좋게 하기 위하여 나선형 인덕터를 이용한 튜닝방법을 제안하였다. 나선형 인덕터의 특성은 3차원 EM(Electromagnetic) 해석방법과 그림 2에 나타난 등가모델을 이용하여 모의실험 되었으며 등가모델의 수동소자들의 값은 측정된 인덕터의 Y 파라미터로부터 추출되었다. 인덕터를 제작하는데 사용된 금속은 금으로 도금된 백금이며, 그림 3에 나타난 제작된 인덕터의 크기는 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 이다.

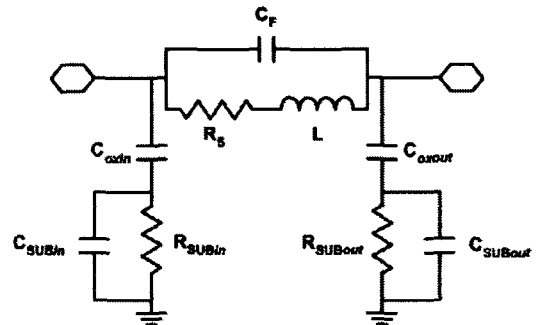


그림 2. 인덕터 등가모델

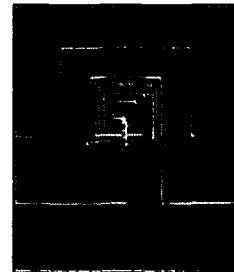


그림 3. 제작된 인덕터

EM 모의실험과 등가모델을 이용한 모의실험 결과를 제작된 인덕터의 측정결과와 함께 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 주파수에 따른 인덕턴스와 Q값을 보여주고 있으며 이것은 식 (2)에 나타난 것처럼 Y_{11} 의 실수부와 허수부로부터 계산될 수 있다.

$$L = \frac{Im[1/Y_{11}]}{2\pi f}, \quad Q = -\frac{Im[Y_{11}]}{Re[Y_{11}]} \quad (2)$$

모의실험 및 측정된 결과를 비교해 보기 위하여 관심이 있는 주파수 영역에 대해 정리한 것을 표 1에 나타내었다.

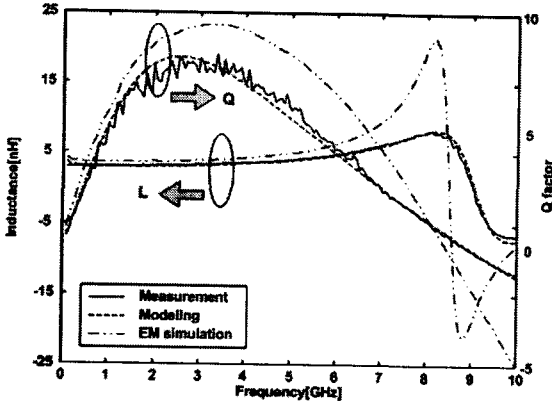


그림 4. 제작된 인덕터의 인덕턴스와 Q 그래프

		EM	등가모델	측정
		모의실험	모의실험	
L(nH)	@2 GHz	3.49	2.95	3.09
	@5 GHz	5.05	3.95	4.04
	@8 GHz	19.5	8.16	8.22
Q	@2 GHz	8.97	7.95	7.93
	@5 GHz	8.2	5.70	6.02
	@8 GHz	1.6	1.37	1.33

표 1. 특정주파수에 대한 인덕턴스와 Q 값

2-3 기판위에서의 인덕터 튜닝

인덕터에 의한 튜닝 효과를 분석하기 위하여 두 가지 형태의 박막공진 여파기가 제작되었다. 첫 번째는 듀플렉서의 송신 여파기처럼 통과대역의 오른쪽이 날카로운 저지대역 감쇠특성을 갖도록 하는 형태이고, 두 번째는 첫 번째와 반대의 특성을 보이는 수신 여파기와 같은 형태이다. 송신 여파기 형태는 네 개의 직렬 공진기와 두 개의 병렬 공진기가 사다리형 구조로 연결 되었으며 두 개의 인덕터를 각 병렬 공진기에 연결함으로써 튜닝 효과를 알아 보았다. 이 경우 그림 5에서 보이는 것처럼 인덕터로 튜닝을 한 송신 여파기가 튜닝을 하지 않은 여파기에 비하여 삽입손실의 변화 없이 저지대역 감쇠특성이 약 10 dB 정도 향상됨을 알 수 있다.

두 번째 형태인 듀플렉서의 수신 여파기는 두 개의 직렬 공진기와 두 개의 병렬 공진기로 구성되었으며, 인덕터는 두 개의 직렬 공진기에 병렬로 연

결되도록 제작되었다. 이 경우, 튜닝 되지 않은 여파기보다 약 8 dB 정도의 향상된 저지대역 감쇠특성을 보이며 통과대역의 대역폭이 약 10 MHz 정도 더 넓어지게 된다. 그림 6에 이러한 결과를 나타내었다.

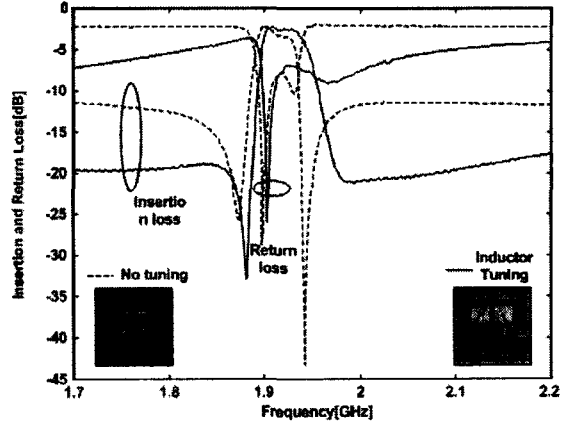


그림 5. 송신 여파기의 튜닝 결과

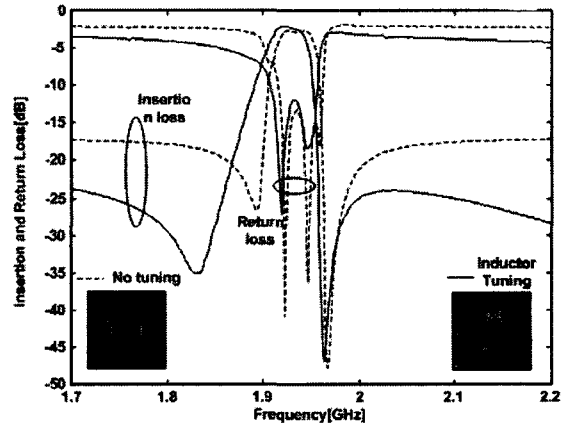


그림 6. 수신 여파기의 튜닝 결과.

III. 결론

본 논문에서는 박막공진기와 인덕터를 실리콘 기판위에 함께 제작함으로써 인덕터 튜닝이 박막공진 여파기 성능에 미치는 영향을 비교, 분석하였다. 박막공진기를 구성하는 요소 중 압전물질로는 AIN가 사용되었고 전극은 백금으로 만들어졌으며, 제작된 단일공진자의 경우 k_p^2 는 4.9%, Q 값은 약 950 이었다. 인덕터는 금으로 도금된 백금을 이용하여 제작 되었으며 2 GHz에서 인덕턴스는 3.09 nH, Q 는 약 8 정도의 값을 가졌다. 듀플렉서의 송,수신 여파기 형태의 박막공진 여파기가 제작되었으며 송신 여파기의 경우는 병렬단에 직렬로 인덕터를 연결함으로

써, 수신 여파기는 직렬단에 병렬로 인덕터를 연결함으로써 인덕터의 튜닝 효과를 알아보았다. 두 경우 모두 약 8~10 dB 정도의 향상된 저지대역 감쇠 특성을 보였으며, 이러한 결과를 통해 기관위에서의 인덕터를 이용한 튜닝이 on-chip 시스템으로 가는 집적화의 가능성을 보여주는 것을 알 수 있었다.

IV. 참고문헌

- [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] 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