論 文
49C - 11 - 7

주파수 가변형 밀리미터파 필터의 제작 및 측정

Fabrication and Measurement of Tunable Millimeter-wave Filters

朴 宰 亨* · 金 弘 得** · 權 泳 佑*** · 金 容 權§

(Jae-Hyoung Park · Hong-Teuk Kim · Youngwoo Kwon · Yong-Kweon Kim)

Abstract - In this paper, new micromachined tunable bandpass filters for multi-band millimeter-wave telecommunication systems are proposed. Two types of mm-wave tunable filters are fabricated using micromachining technology and the responses of the filters are measured. One is two-pole lumped elements filter and the other two-pole resonators filter. Frequency tunability of the filter is achieved by changing the gap between a common CPW ground plate and the movable cantilever beam connected to the transmission line with the controllable range of 2.5 ㎛. The deflection of cantilever beam is measured with the applied DC voltage. With the applied bias voltage from 0 to 50 V, the fabricated filters show 0.6 GHz(2.3 %) at 26.6 GHz , and 0.8 GHz(2.5%) at 32 GHz center frequency shift for the lumped elements and resonators filter, respectively. The life time of the fabricated gold cantilever structure are tested.

Key Words : micromachined tunable bandpass filters, two-pole lumped elements filter, two-pole resonators filter, movable cantilever beam

1. 서 론

현재 수십 GHz 이상의 밀리미터파 대역을 이용하는 고주파 소자의 핵심 부품 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고주파 소자의 제작 기술에 있어서 스위치나 바랙터(varactor), 트랜지스터 등과 같이 외부 회로로 따로 부착되는 수동 및 능동 소자로 인한 전기적 손실 증가는 고품질의 밀리미터파 송수신 시스템의 제작을 어렵게 한다. 최근 이러한 문제점의 해결 방법으로서 마이크로머시닝 기술을 이용한 고주파 소자의 제작에 관한 연구가 많은 주목을 받고 있다. 마이크로머시닝 기술을 사용함으로써 외부 회로로 따로 필요한 소자들을 집적화 할 수 있고 이로 인해 신호 전송 시 발생되는 손실을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 제작비용, 소자의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다.

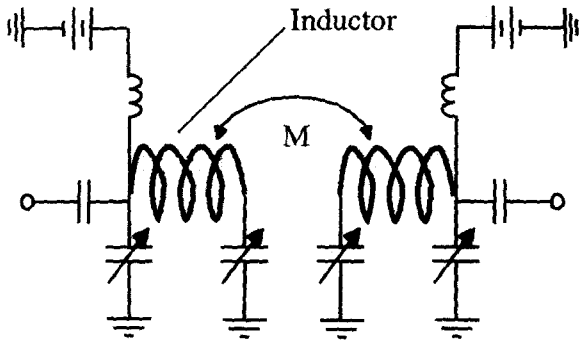
마이크로머시닝 기술을 응용한 고주파 소자의 주요 연구 분야로는 손실 및 분산이 작은(low loss and low dispersion) 전송선, 가변 캐패시터 스위치 및 이를 이용한 RF filter, VCO(Voltage-controlled oscilator), phase shifter 등이 있다[1-7]. 특히 다기능을 가지는 고주파 다중 대역 송수신 시스템에 적용하기 위한 RF filter에 관한 연구 결과가 많이 나오고 있으며 마이크로머시닝 기술을 이용하여 마이크로파와 밀리미터파에서 응용하는 여러 가지 형태의 필터가 제안되었다[8-11]. 그러나 이전의 중심 주파수 가변형 필터 연구에서는 중심 주파수가 수백 MHz 정도에서만 가능하였고 수십 GHz 이상의 고주파 필터에서는 중심 주파수가 고정되어 있기 때문에 이를 가변 시키기 위해서는 바랙터 등과 같은 외부 소자를 따로 필요로 하게 된다. 이는 다중 대역을 가지는 통신 시스템에 응용하기에 적합하지 않다. 본 논문의 목적은 마이크로머시닝 기술을 이용하여 30 GHz 정도의 고주파에서 중심 주파수 가변이 가능한 두 가지 형태의 밀리미터파 필터를 제안하고 제작된 필터의 신호 전달 특성을 통하여 마이크로머시닝 기술을 이용한 가변형 고주파 필터의 가능성을 확인하는 데 있다.

* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程
** 非 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程
*** 非 會 員 : 서울大 電氣工學部 助敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 副敎授 · 工博
接受日字 : 2000年 2月 17日
最終完了 : 2000年 11月 3日

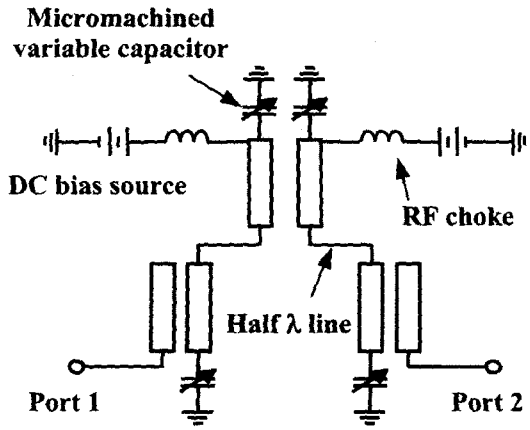
2. 필터의 설계 및 제작

2.1. 설계

본 연구에서 제안된 두 가지 형태의 가변형 밀리미터파 필터의 회로도는 그림 1 과 같다. 그림 1 (a)는 나선 형태로 제작된 인덕터와 가변 정전 용량기를 연결하여 LC 공진을 이용한 필터(two-pole lumped elements filter)를 나타내며, 그림 1 (b)는 반파장 공진기를 이용한 필터(two-pole resonators filter)이다. 그림에서와 같이 필터는 CPW (coplanar waveguide) 신호 전송선(transmission line)과 이 끝에 연결된 가변 정전 용량기, 그리고 가변 정전 용량의 값을 변화시키기 위한 DC 바이어스 선 등으로 구성하였다. 이와 같이 연결된 정전 용량기의 값을 변화시킴으로써 중심 주파수를 가변 시키도록 설계하였다. 그림 2 와 3은 유리기판 (Corning #7740) 위에 제작된 각 필터의 전자 현미경 사진이다. LC 공진을 이용한 필터의 전체 크기는 3.4 mm × 2.9 mm 이며 반파장 공진기를 이용한 필터의 경우는 4.1 mm × 3.4 mm 이다.



(a)



(b)

그림 1 두 가지 형태의 가변형 밀리미터파 필터 회로도 (a) two-pole lumped elements filter, (b) two-pole resonators filter

Fig. 1 Topologies of two millimeter-wave tunable filters (a) two-pole lumped elements filter (b) two-pole resonators filter

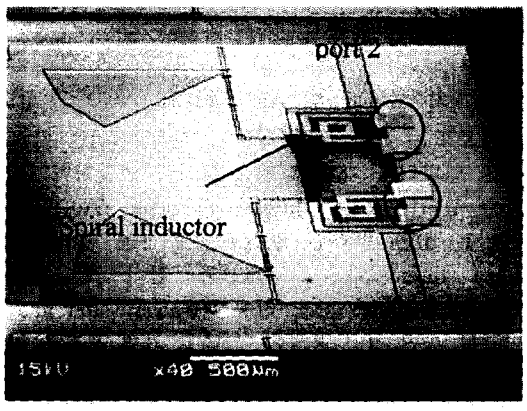


그림 2 제작된 two-pole lumped elements filter 의 SEM 사진

Fig. 2 SEM photograph of fabricated two-pole lumped elements filter

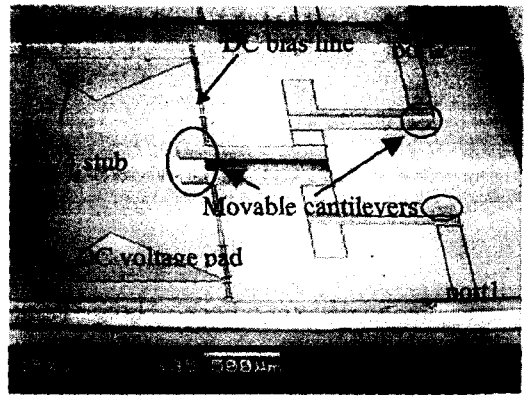


그림 3 제작된 two-pole resonators filter 의 SEM 사진

Fig. 3 SEM photograph of fabricated two-pole resonators filter

가변 정전 용량기를 구현하기 위해 한쪽 부분이 고정되어 움직이는 외팔보 구조를 사용하였다. 구조물과 바닥 CPW 접지 전극 사이에 전압을 인가함으로써 구조물과 바닥 전극 사이의 거리를 조절할 수 있고 이를 통해 정전 용량을 제어한다. 그림 4 는 외팔보 구조의 전자 현미경 사진이다. 외팔보 구조의 크기는 200 ㎛ × 200 ㎛ 이며 바닥 전극으로부터 6 ㎛ 떠 있다.

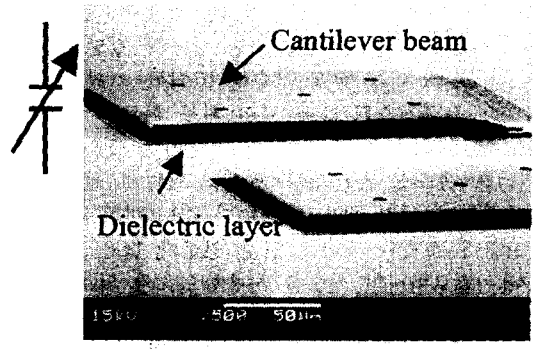


그림 4 가변 정전 용량기로 사용되는 외팔보 구조

Fig. 4 Cantilever structures for variable capacitors

2.2 제작

2.2.1 제작 공정

저 손실의 밀리미터파 필터의 구현을 위해 신호 전송선, 가변 정전 용량기는 금 전해 도금 구조물을 이용하여 제작하였다. 기판으로는 표면 유전체 손실을 줄이기 위해 유리(Corning #7740)기판을 사용하였다. 가변형 고주파 필터의 제작 공정은 그림 5와 같다. 먼저 신호 전송 선 부분의 금 전해 도금 기반층으로 Ti(200 Å) 과 Au(1500 Å)을 열증착(thermal evaporation) 방법을 사용하여 연속적으로 증착한다(그림 5 (a)). 그 위에 감광제(AZ4533)를 3.5 ㎛ 높이로 도

포한 후 사진 식각 과정을 거쳐 도금틀을 형성하여 금 전해 도금을 해서 2 ㎛ 두께의 신호 전송 선 부분을 제작한다(그림 5 (b)). 그리고 도금틀과 기반층을 제거한 다음(그림 5 (c)), 구조물을 구동할 때 바닥 전극과의 절연을 위해 산화막을 패터닝한다(그림 5 (d)). 6 ㎛ 두께의 희생층 형성을 위해 감광제(AZ4562)를 사진 식각 공정으로 패터닝한 후(그림 5 (e)) 구조물 전해 도금을 위해 필요한 기반층이 옆벽에도 균일하게 증착되도록 감광제를 열처리한다(그림 5 (f)). 그런 다음 도금 구조물을 위한 기반층을 증착하고 후막 감광제(PMER P-LA900PM)를 이용하여 도금틀을 제작한다(그림 5 (g)). 여기에 금을 전해 도금함으로써 원하는 형태의 구조물을 제작할 수 있다(그림 5 (h)). 마지막으로 도금틀을 제거하고 기반층을 식각한 다음 희생층을 제거함으로써 가변 고주파 필터를 위한 떠 있는 구조물이 형성된다(그림 5 (i), (j)). 평면에 인덕터를 형성하기 위한 양팔보 구조물은 전압에 따라 가변되는 구조물이 아니므로 그림 5 (d)에서와 같은 절연막 형성 공정을 필요로 하지 않는다. 이 공정을 제외하면 가변 정전 용량기를 제작하는 방법과 같은 방법으로 평면에 나선 모양의 인덕터를 제작할 수 있다.

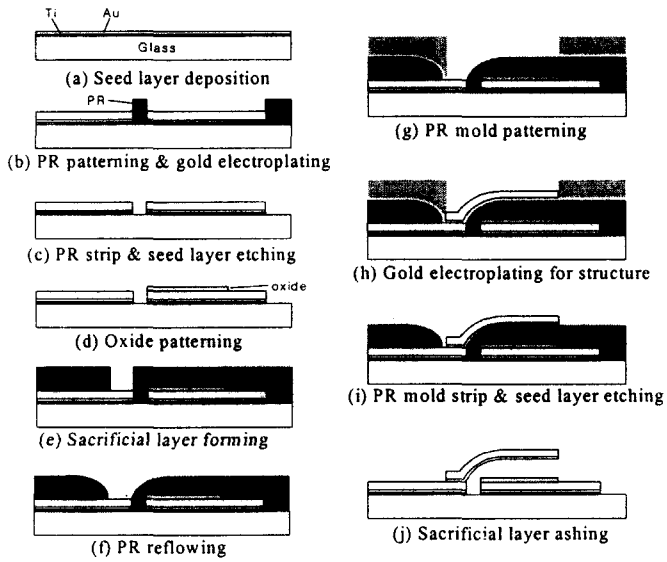


그림 5 제작 공정

Fig. 5 Fabrication process

2.2.2 금 전해 도금

본 연구에서는 미세한 금 구조물 제작하기 위해서 전해 도금을 이용하였다. 도금틀로 사용된 감광막이 도금액에 영향을 받지 않게 하기 위해서 도금액으로는 상용 비시안계 금 전해액(NEUTRONEX 210 B)을 사용하였다. 도금을 할 때 전해액의 온도는 60 ℃ 로 고정하였다. 그림 6 은 전해 도금시의 전류 밀도에 대한 도금 속도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 도금 속도는 전류밀도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서는 도금의 안정성을 고려하여 도금시의 전류 밀도는 2 mA/㎠로 고정하였으며 이때의 도금 속도는 0.125 ㎛/min 이다. 이 경우 도금된 금 구조물의 표면 거칠기(Ra)는 약 0.061 ㎛ 이다. 이와 같은 실험 결과를 이용하여 설계된 전송선의 두께를 조절하여 제작할 수 있다.

2.2.3 희생층 제거 공정

산소 플라즈마를 이용한 애싱(ashing)에 의해 희생층을 제거한다. 희생층 제거시 사용되는 애싱의 조건은 표 1과 같다. 희생층을 제거한 후 변형이 없는 외팔보 구조를 형성하기 위해서는 희생층 제거 공정에서 플라즈마에 의해 발생되는 열로 인해 구조물이 변형되는 것을 막아야 한다. 이를 방지하기 위해서 희생층을 제거할 때 플라즈마에 의해 연속적으로 노출되는 시간을 5분 이하로 줄이고 또한 5분 간격으로 기판을 식혀 주면서 희생층을 식각하였다.

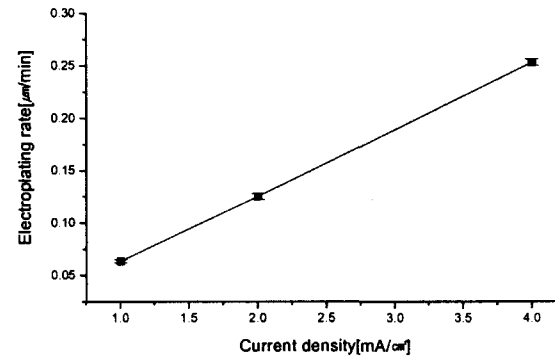


그림 6 전류 밀도에 따른 도금 속도

Fig. 6 Electroplating rate with current density

표 1 희생층 제거 조건

Table 1 Sacrificial layer ashing condition

Gas	O_2
Flow rate[sccm]	200
Chamber pressure[Pa]	200
Microwave power[W]	300

3. 측정 결과 및 검토

3.1 필터의 신호 전달 특성

외팔보 구조물에 정전압을 인가하면 구조물은 정전력에 의해 변위가 변한다. 인가 전압에 따른 구조물의 변위를 비접촉 레이저 변위계를 이용하여 측정하였다. 그림 7은 구조물의 두께가 각각 1.8 ㎛ 와 2.4 ㎛ 인 경우 인가 전압에 따른 구조물 끝 부분의 변위 측정 결과이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 인가 전압이 증가함에 따라 구조물이 서서히 증가하다가 문턱 전압 이상이 인가되면 구조물이 바닥 전극에 갑자기 달라붙는 현상이 발생한다. 측정된 문턱 전압은 1.8 ㎛ 와 2.4 ㎛ 구조물에 대해 각각 53 V 와 77 V로 관찰

되었다. 실제로 필터에서 가변 정전 용량기로 사용될 때 구조물의 변위가 연속적으로 변하는 영역에서만 정전 용량 변화를 제어할 수 있고 본 실험에서 제작된 구조물의 경우 제어 가능한 구조물 변위의 범위는 약 2.5 ㎛이다.

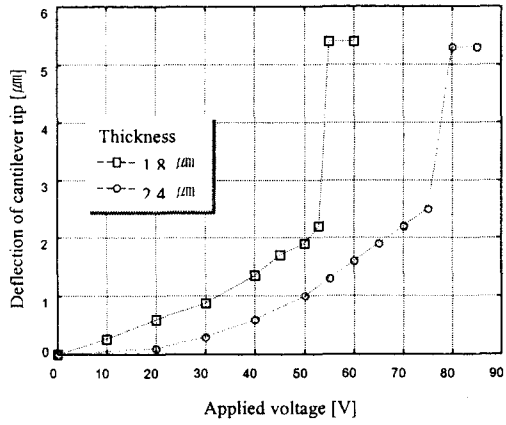
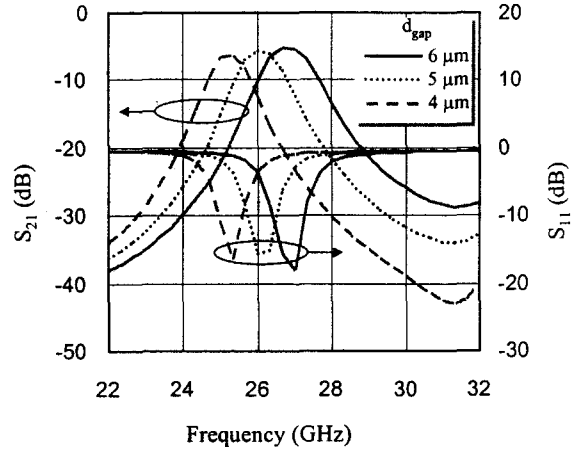
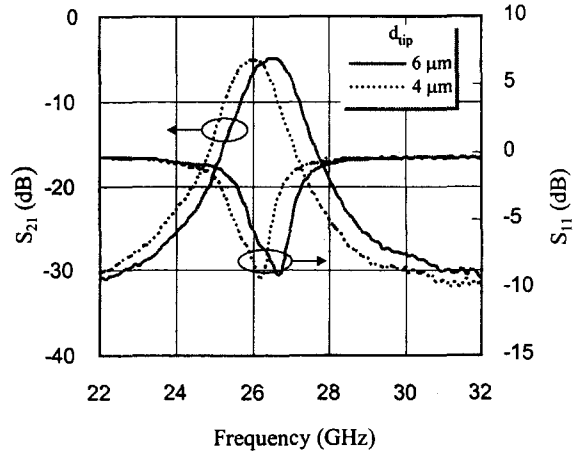


그림 7 인가 전압에 따른 구조물의 변위
Fig. 7 Beam deflection with applied DC voltage

제작된 필터에 대해 신호를 인가하여 필터 특성을 관찰하고 구조물에 전압을 인가하여 중심 주파수의 변화 정도를 측정하였다. 측정을 위한 calibration은 상용으로 사용되고 있는 ISS(Impedance standard substrate)를 이용하여 SOLT(Short-open-load-thru) 방법으로 하였다. 그림 8은 LC 공진을 이용한 필터(그림 1 (a) two-pole lumped elements filter)의 경우 시뮬레이션 결과와 실제 제작된 필터의 측정 결과를 비교한 것이다. 그림 9는 반파장 공진기를 이용한 필터(그림 1 (b) two-pole resonators filter)의 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 나타낸다. 설계된 필터의 시뮬레이션을 위해 상용 소프트웨어인 IE3D를 이용하였다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 LC 공진을 이용한 경우, 외팔보 구조물에 0 V에서 50 V의 전원을 인가함에 따라 중심 주파수가 26.6 GHz에서 26 GHz로 변화하였다(2.3% tuning). 또한 제작된 필터의 Q_L(Loaded Q factor) 과 Q_U(Unoaded Q factor) 값은 각각 21 과 49임을 알 수 있다. 반파장 공진기를 이용한 필터의 경우에는 중심 주파수가 32 GHz에서 31.2 GHz로 2.5 % 정도 가변 하였다. 밀리미터파 대역의 주파수를 응용한 한 예로, 현재 LMDS(Local multipoint distribution service)와 같은 통신 서비스에서 송수신의 주파수 간격은 대략 1 GHz 이며 송수신부 각각의 주파수 대역 또한 대략 1 GHz정도이므로 한 개의 필터로 두 대역의 주파수를 이용하기 위해서 1GHz 정도의 주파수 가변이 필요하다. 본 연구에서 제작된 가변 필터의 경우 측정 결과에서 알 수 있듯이 주파수 가변이 약 0.6 GHz 와 0.8 GHz 로서 이와 같은 구조를 개선함으로써 LMDS 서비스와 같은 밀리미터파 통신 시스템에 응용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 제작된 필터의 중심 주파수 가변 범위는 시뮬레이션 결과에서 예측된 중심 주파수 가변 범위에 비해 작은 값을 가진다. 이것은 가변 정전 용량을 변화시키기 위해 사용되는 두 평판사이의 거리에 있어서 시뮬레이션에서 사용된 모델은 실제 제작된 필터에서의 구조물 변이와는 다르기 때문이다. 즉 시뮬레이션에서는 가변 정전 용량기의 두 평판이 항상 평행하게 유지를 하면서 두 판사이의 거리를 변화하는 것으로 계산된 반면 제작된 필터의 경우 외팔보 구조물에 의한 정전 용량의 변화이다. 구조물 끝 부분의 변위가 가장 큰 반면 구조물의 앵커 부분은 거의 변위가 발생하지 않기 때문에 실제로 계산된 값에 비해 제작된 필터의 경우, 정전 용량의 변화가 작고 또한 중심 주파수의 가변 범위도 작아진다.



(a)

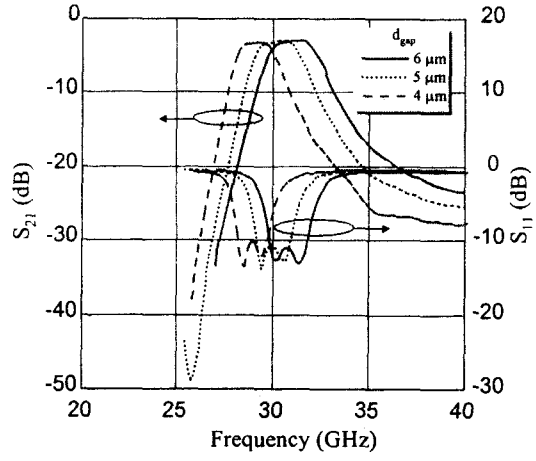


(b)

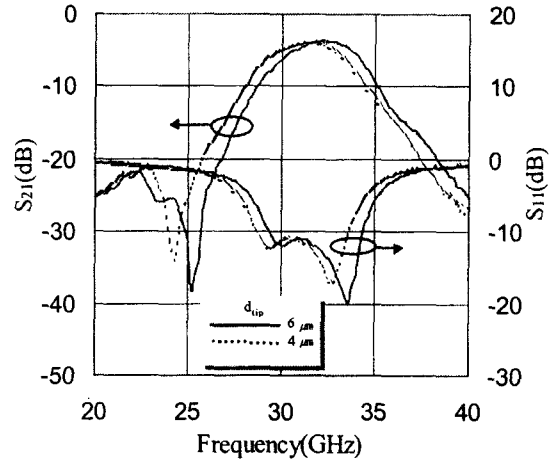
그림 8 two-pole lumped elements filter 특성 (a) 시뮬레이션 결과 (b) 측정 결과
Fig. 8 Characteristics of two-pole lumped elements filter (a) simulations (b) measurements

두 가지 형태의 필터에 대해 필터 손실은 각각 4.9 dB와 3.8 dB로 관찰되었다. 이는 유리 기판에서 발생하는 유전체 손실과 금 구조물의 도체 손실 및 radiation에 의해 발생하는 손실로 생각할 수 있다. 이를 확인하기 위해 유리 기판의 유전체 손실이 없는 경우와 이를 포함한 경우의 시뮬레이션 결과를 비교해보았다. 시뮬레이션 결과 LC 공진 필터의 경우 유전체에 의한 손실이 3.5 dB로 계산되었고 반파장 공진기를 이용한 필터의 경우에는 2 dB로 계산되었다. 또한

실험에서 사용된 금 도금 구조물의 도체 손실은 30 GHz 정도에서 약 2 dB/cm를 나타냄을 측정을 통해 알 수 있는데, 이와 같은 결과로부터 제작된 필터에서 나타난 필터 손실은 시뮬레이션에서 알 수 있는 유전체 손실과 측정된 도체 손실과의 합으로 나타남을 알 수 있다. 특히 유전체 손실값이 크기 때문에 저항이 큰 기판을 사용함으로써 필터의 손실을 개선할 수 있으리라 기대된다.



(a)



(b)

그림 9 two-pole resonators filter 특성 (a) 시뮬레이션 결과 (b) 측정 결과

Fig. 9 Characteristics of two-pole lumped elements filter (a) simulations (b) measurements

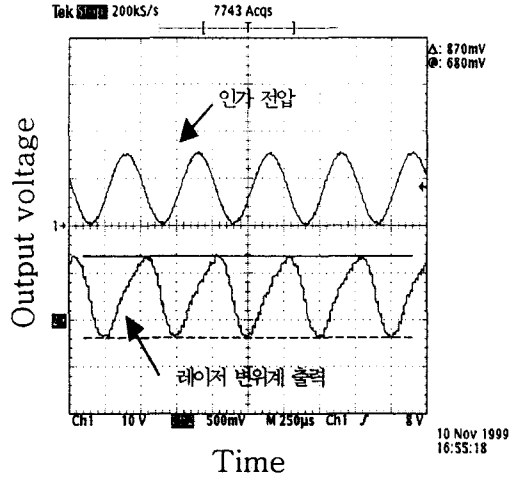
3.2 금 외팔보 구조물의 수명 측정

본 논문에서 제작된 필터는 금 외팔보 구조물의 가변에 의한 정전 용량의 변화에 의해 중심 주파수를 가변한다. 따라서 이러한 용도로 사용되는 경우, 금 구조물의 피로 파괴 현상과 메모리 현상과 같은 소자의 수명 측정이 필요하다. 본 논문에서는 금 구조물의 수명을 측정하기 위해서 외팔보 구조물을 제작하고 제작된 외팔보 구조물을 반복적으로 구동시키면서 피로 파괴 현상 및 메모리 현상의 여부를 측정하였다. 그림 10 은 수명 측정을 위해 제작된 외팔보 구조물의 전자 현미경 사진이다. 수명 측정을 위해서 사용된 외팔보 구조물의 길이는 500 ㎛ 이며, 구조물의 두께는 2.2 ㎛ 이다. 구조물과 기판 전극 사이의 간격은 6.7 ㎛ 이며 구조물이 기판에 붙어서 단락되는 것을 방지하기 위해 1 ㎛ 두께의 실리콘 산화막을 기판 전극위에 형성하였다.

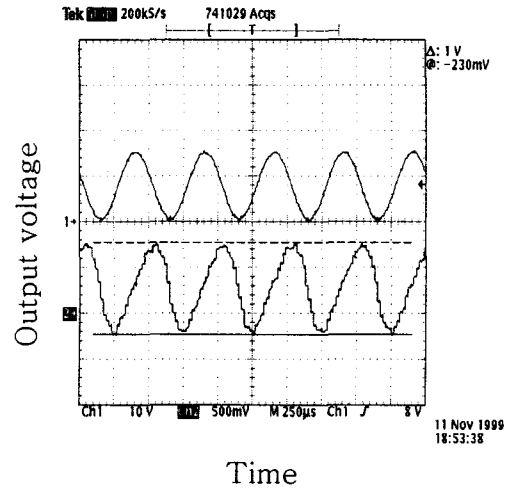
그림 10 수명 측정을 위해 제작된 금 외팔보 구조물

Fig. 10 Cantilever structure for the measurement of life time

구동 중 구조물의 메모리 현상은 반복적인 구동 시 구조물 변위가 변화하는 지의 여부로 판단할 수 있으며 피로 파괴 현상 여부는 구조물의 공진 주파수 변화를 관찰함으로써 알 수 있다[12,13]. 반복적인 구동 중의 구조물 변위를 측정하기 위해서 비접촉식 레이저 변위계(non-contact laser displacement meter, LC2420, KEYENCE)를 사용하였다. 레이저 변위계의 변위 검출 해상도는 0.01 ㎛이며, 샘플링 주파수는 50 kHz 이다. 또한 인가 전압 신호와 레이저 변위계의 출력 신호를 신호 분석기(dynamic signal analyzer, HP 35670A, Hewlett-Packard)에 입력하여 구조물의 주파수 특성 곡선을 얻을 수 있고 따라서 구조물의 공진 주파수 변화를 관찰할 수 있다. 실험에서는 구조물의 반복적인 구동을 위해서 2 kHz의 정현파 신호를 인가하였고, 인가 전압의 크기는 16 V_{p-p} 이다. 이와 같은 인가 전압 신호에 대한 외팔보 구조물의 끝부분 변위를 레이저 변위계를 이용하여 관찰하였다. 그림 11 은 초기 상태와 1.7×10^8 번의 반복 동작 후의 인가 전압에 대한 레이저 변위계의 출력 파형을 나타낸다. 전압을 인가한 후, 초기 상태에서의 구조물 끝 부분 변위는 2.18 ㎛ 로 관찰되었으며, 구조물이 1.6×10^8 번 반복 동작할 때까지는 구조물 변위가 변하지 않는다. 그러나 그림 11 에서와 같이, 초기 상태에서의 구조물 변위에 비해 1.7×10^8 번의 반복 동작 후에는 구조물의 변위가 약 2.5 ㎛로 증가했음을 관찰할 수 있다. 이 상태에서 구조물의 반복 구동이 계속되면 변위는 계속해서 증가하게 되고 결국 구조물이 기판 전극에 달라붙게 된다. 이는 구조물이 반복적으로 한쪽 방향으로만 구동됨으로써 메모리 현상이 발생하였음을 의미한다. 즉, 초기의 구조물 위치에서 반복적으로 구동됨에 따라 구조물이 기판 전극 쪽으로 변형이 발생하여 변위가 계속해서 증가하게 되는 것으로 생각할 수 있다.



(a)

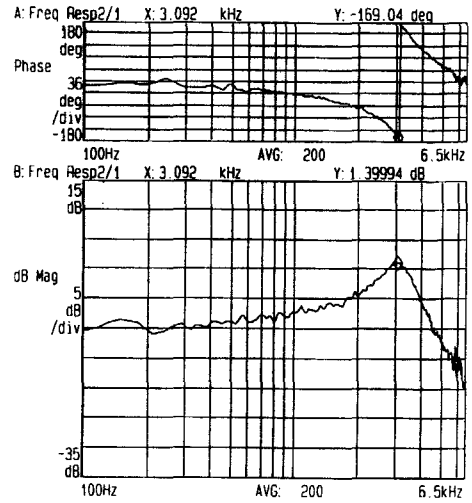


(b)

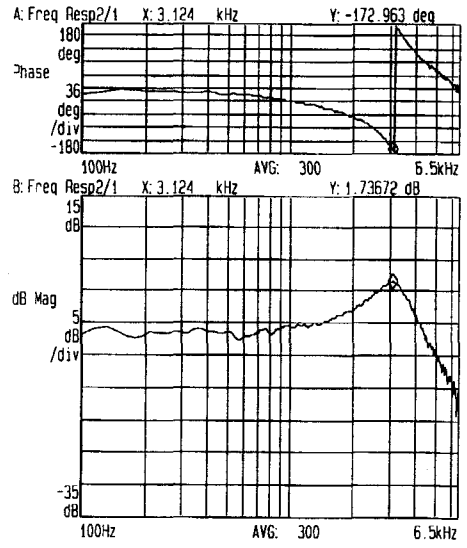
그림 11 수명 측정을 위한 외팔보 구조물의 인가 전압에 대한 변위 출력 파형 (a) 초기 상태 (b) 1.7 × 10^8 번 반복 동작 후

Fig. 11 Beam displacement of cantilever sturcture with applied voltage (a) initial state (b)after 1.7 × 10^8 times repeated operation

그림 12는 초기 상태와 1.7 × 10^8 번의 반복 동작 후, 구조물의 주파수 특성 곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 초기 상태에서의 구조물 공진 주파수는 3.092 kHz 였고, 구조물의 변위가 변한 1.7 × 10^8 번의 반복 동작 후에도 공진 주파수가 3.124 kHz로서 거의 변함이 없었다. 즉, 구조물은 실험된 반복 동작 범위 내에서는 피로에 의한 파괴 현상이 발생하지 않았음을 의미한다. 결론적으로, 실험에서 측정된 금 외팔보 구조는 1.7 × 10^8 번의 반복 동작 후 피로 파괴 현상은 발생하지 않았지만 메모리 현상에 의해 구조물의 변위가 계속해서 증가하는 것을 알 수 있다. 수명 측정을 위한 구조물의 경우 길이가 500 ㎛로 필터에서 사용된 구조물에 비해 길지만 외팔보 구조물의 두께와 바닥 전극사이의 간격은 각각 2.2 ㎛와 6 ㎛정도로 필터에서 사용된 구조물과 같은 조건으로 제작이 되었다. 같은 구조로 800 ㎛ 길이의 구조물을 제작 후 수명을 측정해 본 결과 4.4 × 10^7 번 반복 동작 후 메모리 현상이 관찰되었다. 이 실험을 통해 구조물의 길이가 길어지면 메모리 현상이 빨리 나타나는 것을 알 수 있고 따라서 필터에서 사용된 외팔보 구조물의 경우에는 수명이 더 길어질 것을 예상할 수 있다.



(a)



(b)

그림 12 수명 측정을 위한 외팔보 구조물의 주파수 특성 곡선 (a) 초기 상태 (f_0=3.092 kHz) (b) 1.7 × 10^8 번 반복 동작 후(f_0=3.124 kHz)

Fig. 12 Frequency responses of cantilever beam for life time test (a) initial state (f_0=3.092 kHz) (b) after 1.7 × 10^8 times repeated operation (f_0=3.124 kHz)

4. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 영역에서 중심 주파수 가변이 가능한 새로운 형태의 필터를 제안하였다. 이를 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작하였으며 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교, 분석하였다. 측정 결과, LC 공진을 이용한 경우, 외팔보 구조물에 0 V에서 50 V의 전원을 인가함에 따라 중심 주파수가 26.6 GHz에서 26 GHz로 2.3 % 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 반파장 공진기를 이용한 필터의 경우에는 중심 주파수가 32 GHz에서 31.2 GHz로 2.5 % 정도 가변되었다. 또한 메모리 현상과 피로 파괴 현상의 여부를 관찰함으로써, 주파수 가변을 위해서 사용된 금 외팔보 구조물의 수명을 측정하였다. 측정 결과 1.6×10^8 번의 반복 구동까지는 메모리 현상과 피로에 의한 파괴 현상이 발생되지 않음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 결과를 통해 마이크로머시닝 기술을 이용함으로써 다중 대역 통신 시스템 구현을 위한 저 비용의 집적화된 밀리미터파 필터의 가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부와 산업자원부가 주관하는 초소형 정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] D. J. Young, V. Malba, J. J. Ou, A. F. Bernhardt, and B. E. Boser, "A Low-Noise RF Voltage-Controlled Oscillator Using On-Chip High-Q Three-Dimensional Coil Inductor and Micromachined Variable Capacitor," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Dig. Tech. Papers, pp. 128-131, 1998.

[2] D. J. Young and B. E. Boser, "A Micromachined Variable Capacitor For Monolithic Low-Noise VCOS," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Dig. Tech. Papers, pp. 86-89, 1996.

[3] N. S. Baker and G. M. Rebeize, "Distributed MEMS true-time delay phase shifters and wide-band switches," IEEE Microwave Theory and Technique Simp. Digest, pp 299-302, 1999.

[4] T. M. Weller, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "High performance microshield line components," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, no. 3, pp. 534-543, 1995.

[5] T. D. Kudrle, H. P. Neves, D. C. Rodger, and N. C. MacDonald, "A microactuated millimeter wave phase shifter," Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Dig. Tech. Papers, pp. 1276-1279, 1999.

[6] R. W. Jackson, "Considerations in the use of coplanar waveguide for millimeter-wave integrated circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 34, no. 12, pp. 1450-1456, 1986.

[7] A. Reichelt, and I. Wolff, "New coplanar-like transmission lines for application in monolithic integrated millimeter-wave and submillimeter-wave circuits," in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 99-102, 1999.

[8] P. Blondy, A. R. Brown, D. Cros, and G. M. Rebeiz, "Low Loss Micromachined Filters for Millimeter-Wave Telecommunication Systems," IEEE MTT-S, pp. 1181-1184, 1998.

[9] S. V. Robertson, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "Micromachined Self-Packaged W-Band Bandpass Filters," IEEE MTT-S, pp. 1543-1546, 1995.

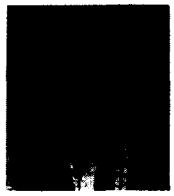
[10] R. Brown, G.M. Rebeiz, Micromachined micropackaged Filter Banks, IEEE Microwave and Guided Wave Letters. Vol.8, No. 4, pp. 158-160, 1998.

[11] T. L. Willke, and S. S. Gearhart, "LIGA micromachined planar transmission lines and filters," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, no. 10, pp. 1681-1688, 1997.

[12] M. R. Douglass, "Lifetime estimates and unique failure mechanisms of the digital micromirror device(DMD)," Proc. 36th IRPS, pp. 9-16, 1998.

[13] S. W. Chung, and Y. K. Kim, "Measurements of a fabricated micro mirror using a lateral-effect position-sensitive photodiode," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 6, pp. 861-865, 1998.

저 자 소 개



박 재 형 (朴 宰 亨)

1997년 서울대학교 공대 전기공학부 졸업. 1999년 동대학원 졸업(석사). 1999-현재 동대학원 전기공학부 박사 과정

Tel : 02-888-5027, Fax : 02-873-9953

E-mail : parkjae@chollian.net

김 홍 득 (金 弘 得)

1991년 부산대학교 공대 전자공학과 졸업.1993년 한국과학기술원 전기.전자공학과 졸업(석사). 1993년-현재 LG종합기술원 선임연구원. 1998년-현재 서울대학교 전기공학부 박사과정

Tel : 02-880-8482, Fax : 02-880-8216

E-mail : htkim@plaza.snu.ac.kr

권 영 우 (權 泳 佑)

1988년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1990년 University of Michigan M.S.E.E. 1994년 University of Michigan Ph.D 1994년-1996년 Rockwell International Science Center, MTS. 1996년-현재 서울대학교 전기공학부 조교수

Tel : 02-880-8416, Fax : 02-880-8216

E-Mail : ykwon@plaza.snu.ac.kr

김 용 권 (金 容 權)

1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동대학원 졸업(석사). 1990년 동경대학교 대학원 졸업(공박). 1990년 히다찌 중앙 연구소 연구원. 1992년-현재 서울대학교 전기공학부 부교수

Tel : 02-880-7440, Fax : 02-873-9953

E-Mail : yongkkim@chollian.net