

15-4-6

128°LiNbO₃ 기판을 이용한 기울인 빗살변환기 구조의 70MHz IF 필터 구현

Implementation of 70MHz IF Filter with Slanted Finger IDTs on 128°LiNbO₃ Substrates

이택주*, 정덕진**

(Taek-Joo Lee* and Duck-Jin Chung**)

Abstract

In this paper, surface acoustic wave(SAW) bandpass filters using slanted finger interdigital electrode transducers(IDTs) are investigated. The slanted finger IDTs are used to design SAW filters with good shape factor, a flat passband, and good out-of-band rejection characteristic. For the filter design, input-output IDT structure was simulated with modified impulse model; uniform-withdrawal weighting IDTs, withdrawal-withdrawal weighting IDTs. SAW filters of uniform-withdrawal weighting IDTs structure were designed and fabricated on 128°LiNbO₃ piezoelectric substrates. Implemented SAW filter has a fractional bandwidth of 30%, center frequency of 70MHz and shape factor of 1.12±0.01.

Key Words : Piezoelectric substrate, Slanted finger IDT filter, Withdrawal weighting, Modified impulse model

1. 서론

대역통과 특성을 갖는 표면탄성과 필터는 현재 필터의 응용분야 전반에 걸쳐 채용되고 있으며, 이러한 실용화 단계를 넘어 고성능화, 소형화, 저가격화가 급속히 진행되고 있다. 반도체 공정에서 사용되는 미세패턴 공정기술이 향상됨에 따라 기존의 표면탄성과 필터보다 높은 중심주파수 및 광대역 또는 협대역 특성을 갖는 표면탄성 필터가 개발되어 이동통신 단말기 및 중계기, 위성통신 방송기기 등의 분야에 채용되고 있다. 표면탄성과 소자는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 압전재료의 표면에 형성된 전극에 의한 공진회로를 이용한 것으로, 공간을 전파하는 전자파를 이

용하기 위해 송수신 안테나를 이용하는 것과 비슷하다. 압전재료의 표면에 빗살형 전극(IDT)을 형성하여 표면탄성과를 발생시켜 필터를 구현할 수 있다. 빗살형의 IDT를 설계하는 방법은 임펄스 응답에 의한 방법, 결합모드(COM) 방정식에 의한 방법, 등가회로 모델에 의한 방법 등을 최적화하여 이용하고 있다[1,2]. 압전재료로 표면탄성과의 진행 방향을 고려한 LiTaO₃, LiNbO₃, quartz 등이 필터 제작에 사용되고 있으며, 최근 PZT 계열의 박막이 연구되고 있다[3].

기울인 빗살변환기 구조를 이용하는 필터의 설계방법은 1968년 building-block 설계의 접근방법을 응용하여 Shibayama, Yamaguchi 등에 의해 처음 제안되었다[2,4]. 1982년 C. K. Campbell 등은 기울인 빗살변환기 구조의 표면탄성과 필터의 통과대역에서 평탄화 특성에 대해 다양한 방법을 연구하였다[2,5]. 기울인 빗살변환기 구조의 필터는 높은 저지대역 레벨을 얻을 수 있기 때문에 기존의 transversal 형태의 빗살변환기 구조를 갖는 필터와 함께 기울인 빗살변환기 구조를 갖는 필터가

* : 인하대학교 전자재료공학과
(인천광역시 남구 용현동 253,
Fax: 032-875-5882
E-mail : googong@korea.com)

** : 인하대학교 정보통신공학부
2001년 11월 15일 접수, 2001년 12월 11일 1차 심사완료,
2002년 1월 3일 최종 심사완료

IF 필터로써 사용되고 있다. Uniform IDT를 배열하여 필터를 구성할 경우 저지대역 레벨은 40 dB 미만이기 때문에, IDT에 하중을 주는 방법으로 주파수 응답특성을 개선한다[8,9].

본 논문에서는 기존의 transversal 형태의 전극 구조에 적용하는 임펄스(impulse) 모델을 기울인 빗살변환기 구조에 맞추어 변형하여 넓은 통과대역 특성을 갖는 70 MHz 대역의 IF 필터에 적용하였다. 또한, IDT 하중에 의한 주파수 응답특성을 시뮬레이션하여 중심주파수 70 MHz, 중심주파수의 약 30%에 해당하는 대역폭을 갖는 필터를 설계 및 제작하였다.

2. 기울인 빗살변환기 구조를 이용한 필터

일반적으로 중간주파수 대역의 필터는 작은 통과대역 리플과 높은 저지대역 감쇄, 예리한 차단 특성을 요구한다. 그러나, 기존의 transversal 형태의 표면탄성과 필터는 이러한 특성을 동시에 만족시키기 매우 어렵다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서 기울인 빗살변환기 구조를 이용한 대역 통과 필터를 이용한다. 이때, uniform-withdrawal weighting을 적용한 기울인 빗살변환기 구조 필터는 transversal 형태의 IDT 보다 적은 전극쌍으로 우수한 저지대역 특성을 제공할 수 있다.

그림 1에 기울인 전극을 이용한 필터의 기본적인 구조를 제시하였다. 그림 1에 보인 바와 같이 기울인 빗살변환기 구조를 갖는 필터를 표면 탄성

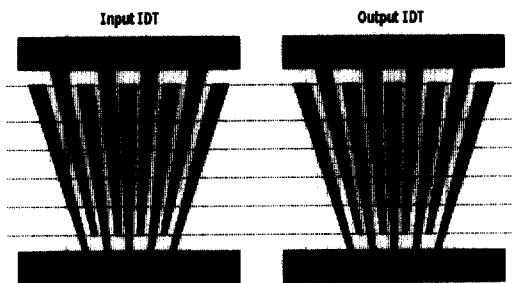


그림 1. 기울인 빗살변환기를 이용한 필터의 기본 구조.

Fig. 1. Basic configuration of the Slanted finger IDT filter.

과의 진행방향과 평행하게 일정한 간격으로 분할하여 형성된 각각의 채널을 하나의 부분필터로 가정할 수 있다. 여기서, 하나의 부분필터로 가정된 각 채널은 각각 서로 다른 중심주파수를 갖는 필터이며, 중심주파수의 중첩을 이용하여 전체 주파수 응답을 얻을 수 있다. 즉, 기울인 빗살변환기 구조를 이용한 필터의 전체 주파수 응답은 각각의 분할된 부분필터 주파수 응답의 합으로 나타낼 수 있다. 이때, 전기적인 전체 필터의 형태는 분할된 부분필터의 병렬 접속으로 나타낼 수 있다. 여기서, 각 채널의 주파수 응답은 임펄스 모델을 적용하여 설계하는 transversal 형태의 전극 구조로 해석할 수 있다[5-7]. 이론적인 임펄스 응답 및 주파수 응답과의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) \exp(j\omega t) d\omega$$

일반적으로 필터의 전체 주파수 응답 특성은 입력 IDT와 출력 IDT 각각의 주파수 응답을 곱한 것과 같으므로

$$H(\omega) = H_1(\omega) \cdot H_2(\omega) \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow h(t) = h_1(t) * h_2(t)$$

이며, 전체 주파수 응답 $H(\omega)$ 은 입력 IDT의 주파수 응답 $H_1(\omega)$ 와 출력 IDT의 주파수 응답 $H_2(\omega)$ 의 곱이고, $h(t)$, $h_1(t)$, $h_2(t)$ 는 각각 시간 영역에서의 임펄스 응답에 해당하며, *는 콘볼루션을 나타낸다.

그림 1에 제시한 기울인 빗살변환기 구조 필터의 전체 주파수 응답을 얻기 위해 전체 필터를 그림 2와 같이 S 개의 채널로 분할하여 임펄스 모델을 적용한다. 기울인 전극을 이용한 필터에서 높은 주파수의 표면탄성파는 기울인 전극의 짧은 주기 부분에 여기되고, 낮은 주파수의 탄성표면파는 긴 주기 부분에서 여기된다. 그림 2에 제시된 매개변수들은 다음 식으로 표현할 수 있다[4-6].

$$f_i = f_{low} + \frac{(f_{high} - f_{low})}{S} \cdot i \quad (3)$$

$$A_i = \frac{f_{high} \cdot f_{low}}{f_i \cdot S \cdot (f_i + f_{high} - f_{low})} \cdot A_o \quad (4)$$

여기서, $i = 1, 2, 3, \dots, S$ 이며, 필터의 최고 주파수(f_{high})와 최저 주파수(f_{low})는 각각 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

$$f_{low} = \frac{v}{\lambda_{low}}, \quad f_{high} = \frac{v}{\lambda_{high}} \quad (5)$$

위 식 (5)에서 v 는 탄성표면파의 속도이며, λ_{high} 와 λ_{low} 는 각각 기울인 전극의 짧은 주기와 긴 주기를 나타낸다.

그림 2와 같은 구조로 기울인 전극을 이용한 필터를 분석할 때, 각각의 부분필터들의 주파수 응답의 합인 $H(f)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다[4,6,7].

$$H(f) = \sum_{i=0}^S A_i(f) f_i^{1/2} \frac{\sin(N_p \pi (f - f_i) / f_i)}{N_p \pi (f - f_i) / f_i} \quad (6)$$

여기서, N_p 는 전극쌍의 수이며, f_i , $A_i(f)$ 는 각각 부분 필터로 정의된 i 번째 채널의 중심주파수와 전극의 길이이다. 위 식에서 입력 및 출력 전극쌍의 개수는 필터 전체 주파수 응답에서 통과대역의 평탄화 정도를 결정하게 된다. 따라서, 최적화된 전극쌍의 개수를 결정하는 것이 요구된다.

일반적으로 기울인 전극을 이용한 필터의 경우,

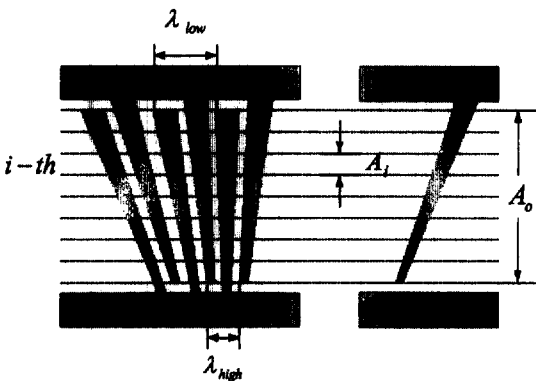


그림 2. 기울인 빗살변환기 구조의 분석 모델.
Fig. 2. Analysis model for Slanted Finger IDT filter.

다음 절에서 제시한 시뮬레이션 결과처럼 통과대역 부분에서 높은 주파수 쪽으로 통과대역이 기울어지는 현상이 발생한다. 이것은 사용되는 압전재료의 특성과 설계된 전극쌍의 전체 길이 및 전극쌍 수에 의한 내부 전극의 임피던스에 의한 영향으로 알려져 있다[6,7]. 이를 해결하기 위한 방법으로는 첫째, 임피던스 정합을 위한 외부 회로를 추가하여 보정하는 방법, 둘째, 표면탄성파의 진행방향과 수직인 방향으로 전극쌍의 수를 변화시켜주는 방법, 셋째, 전극쌍의 전체 길이를 조절하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 통과대역의 평탄특성이 가장 우수한 세 번째 방법을 적용하여 필터의 주파수 응답 시뮬레이션을 통해 최적화된 IDT 전극쌍의 수를 결정하였다. 시뮬레이션을 통해 선택한 uniform-withdrawal weighting 구조에 최대 기울임 각을 이용하여 필터를 설계하였으며, 이를 제작하여 주파수 특성을 검증하였다. 통과대역의 고주파 대역에서 발생하는 음의 기울기를 외부 회로를 추가하는 임피던스 정합 방법을 이용하여 평탄한 통과대역 특성과 삽입손실의 개선을 얻을 수 있었다.

3. 필터의 설계 및 제작

3.1 기울어진 전극 구조 필터의 주파수 응답 특성

본 연구에서는 기울인 빗살변환기 구조가 갖는 장점이 광대역 특성을 이용하여 이동통신 시스템에서 기지국용 IF 필터로 응용할 수 있도록 중심주파수 70MHz, 대역폭 20MHz인 대역통과 필터를 기울인 빗살변환기 구조를 사용하여 설계하였다.

필터의 설계를 위해 Mathematica를 이용하여 주파수 응답특성을 시뮬레이션하였으며, transversal 형태의 필터에 사용되는 임펄스 모델링에 의한 방법을 적용하였다. 전극의 구조에 따른 주파수 응답 특성을 알아보기 위해 입력-출력측의 전극 구조는 uniform-withdrawal weighting[5] 및 withdrawal-withdrawal weighting[8] 구조를 사용하여 시뮬레이션하였으며, 이 때 적용한 압전기판 재료는 128°LiNbO_3 이다. 128°LiNbO_3 기판 위에 형성된 전극을 통과하는 표면탄성파 속도는 3881.64 m/s이며, 전기기계적 결합계수 k^2 은 0.056, 전극 단위 길이당 전극쌍의 정전용량은 5.0 pF/cm이다. 일반적으로 transversal 형태의 필터에서 통과대역의 ripple을 감소시키고, sidelobe 특성을 개선시키기 위해 창함수(window function)를 사용하게 되는데,

본 연구에서는 이러한 창함수의 특성을 withdrawal weighting 의 형성에도 적용하였으며, 사용된 창함수는 Hamming 창함수이다. 여러 개의 부분 필터로 분할된 채널을 진행하는 표면탄성파는 서로 다른 중심주파수를 갖게 되는데, 이러한 중심주파수 차이를 줄이기 위해 채널 분할의 값을 증가시킬수록 주파수 응답 특성을 보다 정확히 예측할 수 있는 대신에 계산 시간이 증가하는 단점이 있다. 따라서, 필터의 주파수 응답을 예측하는데 사용되는 채널 분할의 최소값으로 $S = 100$ 을 적용하였다 [6-8].

일반적으로 uniform IDT의 전극쌍이 많을수록 이상적인 주파수 응답 특성을 얻을 수 있으나, 필터의 크기가 제한되므로 상호 보상관계가 존재한다[2,10]. 본 논문에서는 필터의 전체 크기를 고려하여 입력 및 출력 IDT 전극쌍의 수가 100쌍을 넘지 않는 범위에서 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 시뮬레이션 수행 결과 입력-출력 전극쌍의 구조가 uniform-uniform IDT 구조인 경우, 40 dB 이상의 저지대역 특성을 얻을 수 없었으므로 본 논문에서는 비교대상으로 제시하지 않았다.

그림 3은 uniform-withdrawal weighting 구조를 적용한 기울인 빗살변환기 구조 필터의 주파수 응답 특성이다. 입력-출력층의 전극쌍의 개수는 최적화된 주파수 응답을 얻기 위해 각각 18:15, 36:31, 72:62 변화시켜가면서 시뮬레이션하였다[5]. IDT 전극쌍의 수가 100쌍 이하에서 입력-출력층 전극쌍의 수가 72:62인 경우, 가장 우수한 저지대역 특

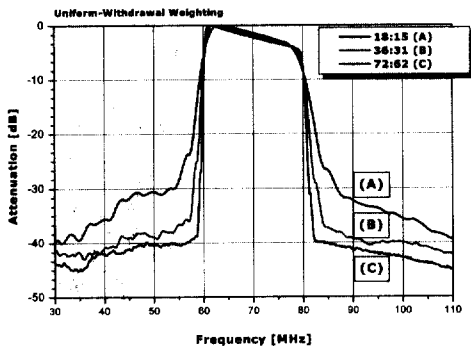


그림 3. Uniform-withdrawal weighting IDT의 주파수 응답 특성 시뮬레이션 결과.
 Fig. 3. Simulated frequency response characteristics with uniform-withdrawal weighting IDT.

성을 보인다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 withdrawal-withdrawal weighting 구조를 적용한 기울인 빗살변환기 구조 필터의 주파수 응답 특성이다. 시뮬레이션에 적용한 입력-출력층의 전극쌍 개수는 각각 50:50, 72:62, 36:72, 72:72 이었으며, uniform-withdrawal weighting 구조와 같은 입력-출력층 전극쌍의 수(72:62)인 경우, 가장

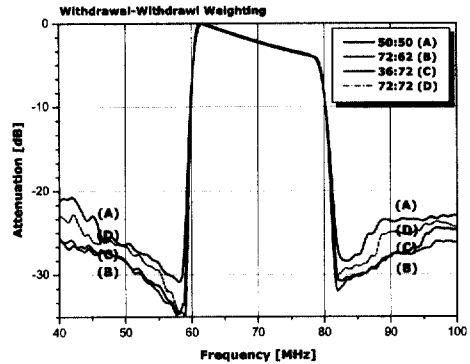


그림 4. Withdrawal-withdrawal weighting IDT의 주파수 응답 특성 시뮬레이션 결과.
 Fig. 4. Simulated frequency response characteristics with withdrawal-withdrawal weighting IDT.

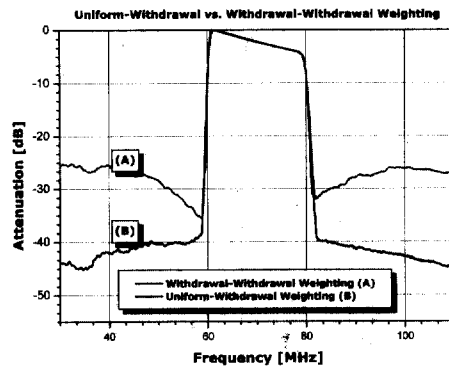


그림 5. Uniform-withdrawal과 withdrawal-withdrawal weighting 구조의 주파수 응답 특성 비교(입력-출력쌍 72:62).
 Fig. 5. Comparison with uniform-withdrawal and withdrawal-withdrawal weighting IDT's frequency response characteristics (input-output IDT with 72:62 pairs).

우수한 저지대역 특성을 보인다는 것을 알 수 있다. 또한, 입력측과 출력측의 전극쌍 비가 동일할 경우, 전극쌍의 수가 많아질수록 저지대역 특성이 향상됨을 알 수 있다.

그림 5는 입력-출력측의 전극 구조를 결정하기 위해 각각의 시뮬레이션 결과 중 우수한 저지대역 특성을 갖는 경우를 비교하였으며, 이때 두 가지 구조 모두 입력-출력 전극쌍의 비가 72:62이었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 입력-출력측 전극쌍의 구조가 uniform-withdrawal weighting 일 경우가 저지대역 특성이 우수하다.

3.2 필터의 설계 및 제작

본 연구에서 적용한 impulse 모델을 이용한 필터의 경우, 전극 길이의 변화에 따른 전체 주파수 응답특성을 정확히 예측할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 전체 전극의 길이를 결정하는 최대 기울임각을 7°, 8°, 9°로 적용하여 설계하였으며[2, 4, 5], 이를 통해 주파수 응답특성을 비교하였다. 기울임 빗살변환기 구조 대역통과 필터의 설계에 사용된 입력 및 출력측 구조는 각각 uniform weighting, withdrawal weighting이며, 전극쌍을 18:15, 36:31, 72:62로 변화시켜 시뮬레이션한 결과 중에서 가장 우수한 저지대역 특성을 보인 72:62의 전극쌍 비를 적용하였다. 마스크를 제작하기 위해 Layout tool은 LASI를 이용하였고, 설계된 필터의 형태와 형성된 패턴의 한 부분을 현미경에 디지털 카메라를 장착하여 촬영한 사진을 그림 6에 함께 제시하였다.

그림 6과 같이 설계된 패턴은 고 정밀도의 사진식각용 포토 마스크로 제작되어, 반도체 제조공정

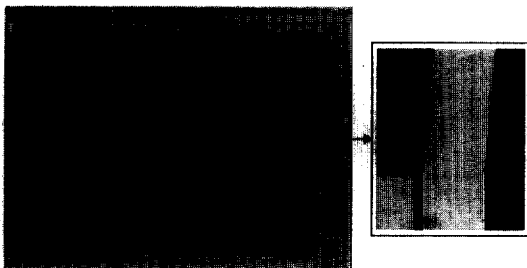


그림 6. LASI로 설계한 기울임 빗살변환기 구조의 대역통과 필터와 형성된 패턴의 형태.

Fig. 6. Designed slanted finger IDT bandpass filter using LASI and implemented pattern feature.

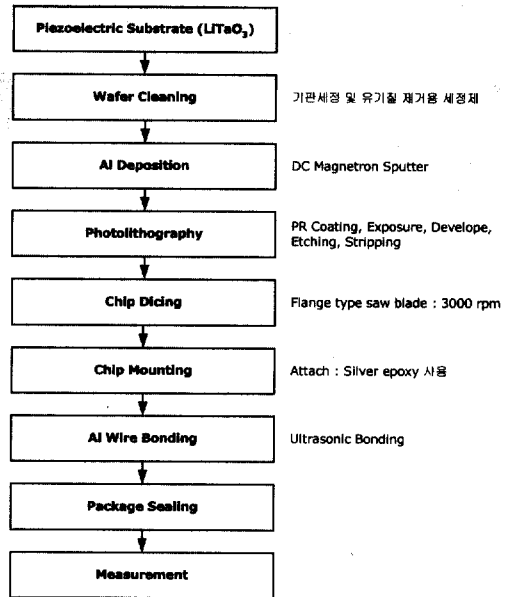


그림 7. SAW 필터 제작을 위한 공정 흐름도.

Fig. 7. Flow-chart of fabrication process for SAW filter.

인 사진식각 방법에 의해 단결정 기판 위에 빗살변환기 전극을 형성하게 된다. Al 전극은 DC magnetron sputter를 이용하여 실온에서 증착한다. Al이 증착된 기판 위에 포토레지스터(PR)를 균일하게 코팅하고, Mask aligner를 이용하여 노광시킨다. 노광후 PR의 현상은 developer(MF-300, 웨스트사)를 이용하였다. PR 현상후에 전극의 식각을 위해 사용할 수 있는 방법으로, 화학적 부식방법과 건식 부식방법, 리프트오프(lift-off) 방법 등이 있으나, 본 연구에서는 비교적 제작 방법이 간단한 습식 화학 부식법을 사용하여 전극을 형성하였다. 다수의 칩이 내장된 단결정 웨이퍼는 초 정밀 절단기에 의하여 절단되고, 각각 분리된 칩을 package에 장착하여 필터를 제작하였다. 본 연구에서 적용된 개략적인 공정 흐름을 그림 7에 제시하였다.

설계된 필터는 압전 기판 재료로 128°LiNbO₃를 사용하여 제작하였고, 전극의 두께는 약 450nm로 형성되었으며, 형성된 패턴에서 측정된 전극과 전극 사이의 비는 약 0.75이다.

4. 제작된 필터의 측정결과 및 고찰

4.1 제작된 필터의 측정 결과

그림 8은 제작된 필터의 주파수 응답을 측정한 결과이다. 최대 기울임 각을 7°로 적용하여 전극 길이를 설계한 경우, 가장 좋은 저지대역 특성을 얻을 수 있었다. 즉, 전극의 길이가 증가할수록 저지대역 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다. 표 1에 시뮬레이션 및 제작된 대역 통과 필터의 주파수 특성을 정리하였다. 제작된 필터의 삽입손실은 -38 dB, shape factor는 1.12±0.01이다.

제작된 필터의 주파수 응답 측정결과, 임펄스 모델을 적용하여 주파수 응답을 예측할 경우 알 수 없었던 30~40 dB의 삽입손실을 확인할 수 있었으며, 통과대역의 고주파 대역에서 발생하는 음의 기울기 및 ripple은 예측값의 경향과 유사하였다. 시뮬레이션(그림 3, 4, 5)과 측정된 결과(그림 8)에서

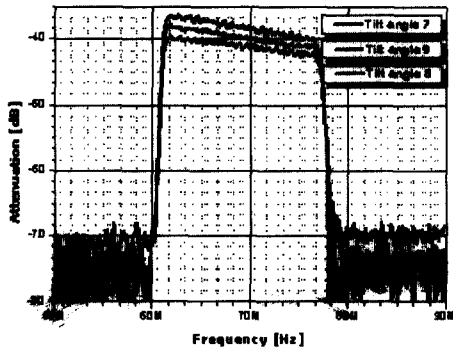


그림 8. 측정된 기울임 전극을 이용한 대역통과 필터의 주파수 응답 특성.

Fig. 8. Measured frequency response characteristics with slanted finger IDT bandpass filter.

표 1. 시뮬레이션 값과 측정값 비교.

Table 1. Comparison with simulated and measured results.

Tilt angle	전극 길이 (mm)	시뮬레이션 3dB/35dB (MHz)	측정결과	
			3dB/40dB (MHz)	측정된 삽입손실 (dB)
7°	3.1	18.1/22.81	15.90/17.83	-38.15
8°	3.5		16.02/18.33	-38.31
9°	4.0		16.08/17.99	-39.81

통과대역의 높은 쪽 차단주파수(80MHz)가 약 15% 낮게 측정되었는데, 이는 전극 두께가 증가하면서 표면탄성파 속도의 감소에 의한 영향으로 생각된다. 즉, h/λ 비가 커질수록 표면탄성파의 속도를 감소시켜, 중심주파수를 낮은 주파수로 이동시키며 대역폭을 감소시키게 된다. 따라서, 넓은 대역폭을 유지하기 위한 적절한 전극두께의 형성이 요구된다. 통과대역의 음의 기울기 및 ripple은 앞서 언급한 바와 같이 외부회로의 임피던스 정합과 표면탄성파의 진행방향과 수직인 전극쌍의 변화를 통해 해결할 수 있을 것이다[2,4-7]. 다음 절에 외부회로의 임피던스 정합을 이용하여 통과대역 특성을 보상하기 위한 회로를 제시하였다.

4.2 외부 회로를 적용한 임피던스 정합

일반적으로 사용되는 임피던스 정합용 회로를 통해 통과대역의 고주파 부분에서 발생하는 음의 기울기 현상을 보정하였으며, 통과대역의 ripple을

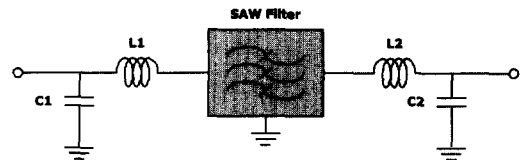


그림 9. SAW 필터의 임피던스 정합회로.

Fig. 9. Impedance matching circuit with SAW filter.

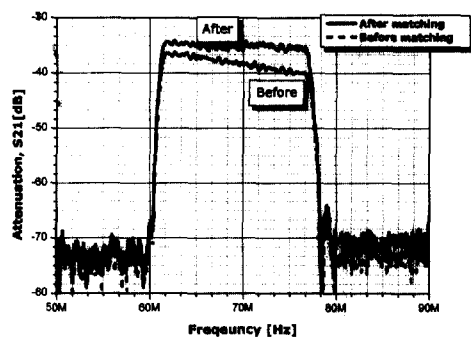


그림 10. 임피던스 정합 후 측정된 기울임 빗살변환기 구조를 이용한 대역통과 필터의 주파수 응답 특성.

Fig. 10. Impedance matched frequency response characteristic of the filter using slanted finger IDT after impedance matching.

감소시켰다. 통신 시스템에 사용되는 50 Ω 임피던스 정합 회로는 수동소자인 인덕터와 커패시터를 소자와 직렬 또는 병렬 연결을 이용하여 구성하게 된다. 외부에 임피던스 정합회로를 추가하여 SAW 필터의 전반 및 후반부와의 특성 임피던스를 50 Ω 으로 정합한 전체 회로도를 그림 9에 제시하였다. 제시된 회로를 이용하여 통과대역에서 발생하는 음의 기울기 현상을 보상할 수 있었으며, 임피던스 정합회로를 추가하는 데에는 통과대역 특성과 삽입손실 사이에 상호 보상관계가 존재하였다. 그림 10에 나타낸 것과 같이 임피던스 정합을 통해 삽입손실은 통과대역에서 약 1.5 dB 이상 향상되었으나, 저지대역 부분 특성이 나빠졌다. 여기서, L1, L2 = 57 nH, C1, C2 = 10 pF이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 transversal 형태의 필터 설계에 쉽게 적용할 수 있는 임펄스 모델을 이용하여 기울어진 전극 구조를 갖는 대역통과 필터를 설계 및 제작하였다. 입력-출력측의 전극쌍의 변화를 통해 주파수 응답을 시뮬레이션하였으며, 전극의 구조는 uniform-withdrawal 구조가 withdrawal-withdrawal 구조를 적용하였을 때, 보다 우수한 저지대역 특성을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한, 전극 길이가 증가할수록 저지대역 특성이 나빠지는 것을 확인하였다. 제작된 필터는 transversal 형태의 대역통과 필터보다 향상된 40 dB 이상의 저지대역 특성과 중심주파수의 약 30%에 해당하는 넓은 통과대역을 제공할 수 있다. 외부 회로를 추가하여 통과대역의 높은 주파수에서 발생하는 음의 기울기와 삽입손실을 개선할 수 있었으며, 향후 임피던스 정합회로를 필요로 하지 않도록 하는 필터의 전극 구조에 대한 연구와 통과대역의 고주파 대역에서 발생하는 음의 기울기를 명확히 분석하여 shape-factor를 정확히 예측할 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 빗살형 전극의 형성시 표면탄성파의 속도에 영향을 주는 전극 두께의 최적화에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

[1] David P. Morgan, "Surface-Wave Devices

for Signal Processing", Elsevier science publishing company Inc., p. 57, 1985.

- [2] Colin K. Campbell, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications", Academic Press Inc., p. 209, 1998.
- [3] 강진규, 백동수, 김준한, 홍재일, 박창엽, "PSS-PZT계 세라믹스의 탄성표면파 속도특성에 관한 연구", 전기전자재료학회 논문지, 6권, 2호, p. 109, 1993.
- [4] T. Hyodo, K. Yamanouchi, and K. Shihayama, "The wide band excitation of elastic surface waves using the interdigital electrodes with variable pitches", Proc. Acoustical Society of Japan, 1968 Autumn Annual Meeting, 3-1-14, Nov. 1968.
- [5] Campbell, Yanglin Ye, and Joseph J. Sferazza papa, "Wide-band linear phase SAW filter design using slanted transducer fingers", IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics, Vol. Su-29, p. 224, July. 1982.
- [6] H. Yatsuda, Y. Takeuchi, and S. Yoshikawa, "New design techniques for SAW filters using slanted-finger IDTs", IEEE Ultrasonic Symp., Proc., p. 61, 1990.
- [7] Hiromi Yatsuda, "Design techniques for SAW filters using slanted-finger interdigital transducers", IEEE Trans. UFFC, vol. 44, p. 453, 1997.
- [8] Evgeniy V. Bausk and Igor B. Yakovkin, "Withdrawal weighted fan-shaped SAW transducers", IEEE Trans. UFFC, vol. 42, p. 164, 1995.
- [9] Bausk E. V. and Yakovkin I. B., "Composite fan-shaped SAW transducers", IEEE MTT-S Digest, p. 1681, 1995.
- [10] Clinton S. Hartmann, Delaber T. Bell Jr., and Ronald C. Rosenfeld, "Impulse model design of acoustic surface-wave filters", IEEE Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-21, No. 4, p. 162, 1975.