

논문 2011-4-1

10 Gb/s 무선 전송 THz 송수신기를 위한 초광대역 마이크로스트립 대역통과필터의 구현

Implementation of Ultra-Wideband Microstrip Bandpass Filter for 10 Gb/s Wireless Transmission THz Transmitter and Receiver

이원희*, 정태진*

Won-Hui Lee, Tae-Jin Chung

요약 본 논문에서는 중심주파수 30 GHz에서 3 dB 대역폭(fractional bandwidth)이 50 % 이상인 마이크로스트립 대역통과필터(BPF)를 구현하였다. 구현된 BPF는 10 Gb/s 무선전송 THz 송수신기를 위한 IF 대역에서의 ASK(Amplitude Shift Keying) 방식 송수신용 필터로서 이용하고자 한다. 초광대역 특성을 갖는 마이크로스트립 BPF는 스텝 임피던스 저역통과필터(LPF)와 합성된 $\lambda_g/4$ 단락 스티브로 구성되며, LPF는 BPF의 상위 저지대역을 감쇠시키기 위해 사용되었고, $\lambda_g/4$ 단락 스티브는 하위 저지대역을 감쇠시키기 위해 사용되었다. 합성 BPF의 측정 결과, 중심주파수 30 GHz에서 삽입손실은 0.65 dB, 10 GHz와 50 GHz에서 저지 특성은 각각 -10 dB와 -16 dB이며, 20~40 GHz 통과대역에서 평탄도는 ± 0.5 dB로 측정되었다.

Abstract In this paper, a microstrip bandpass filter(BPF) with 3 dB bandwidth of more than 50 % at center frequency of 30 GHz was implemented. The implemented BPF is to be used as ASK(Amplitude Shift Keying) transmission and reception filters in IF band for THz transmitter and receiver capable of 10 Gb/s wireless data transmission. The microstrip BPF with ultra-wideband characteristics was implemented using a stepped-impedance lowpass filter(LPF) and a composite quarter-wave short stubs where the LPF is functioning as attenuating the upper stopband and quarter-wave short stubs is functioning as attenuating the lower stopband. The measured results are as follows; the insertion loss is 0.65 dB at 30 GHz, the stopband characteristics are -10 dB and -16 dB at 10 GHz and 50 GHz, respectively, and the passband flatness is ± 0.5 dB at 20~40 GHz.

Key Words : Fractional bandwidth, Microstrip, Bandpass Filter, Ultra-wideband

1. 서론

최근 THz 통신 시스템에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있으며 이 대역의 주파수를 이용한 무선 전송 시연 결과가 문헌에 다수 발표되고 있다^{[1]~[3]}. THz 대역은 0.1~10 THz 범위의 주파수로서 가용한 주파수의

대역폭이 기존 밀리미터파 대역 보다 월등히 높아서 10 Gbps 이상의 초고속 통신에 무한한 잠재력을 가지고 있다. 또한 THz 대역의 주파수에서 동작하는 HEMT(High Electron Mobility Transistor), HBT(Heterojunction Bipolar Transistor) 등의 반도체 소자기술의 눈부신 발전에 힘입어 저잡음증폭기(LNA), 믹서(Mixer), 전력증폭기(PA) 등 RF 송수신기의 핵심 MMIC가 개발되기 시작하였다. 10 Gbps 이상의 데이터 전송을 위하여 단순한 변조방식을 사용하는 경우 20 GHz 이상의 주파수 대역

*정희원, 한국전자통신연구원(ETRI)
접수일자 2011.5.24, 수정일자 2011.7.10
게재확정일자 2011.8.12

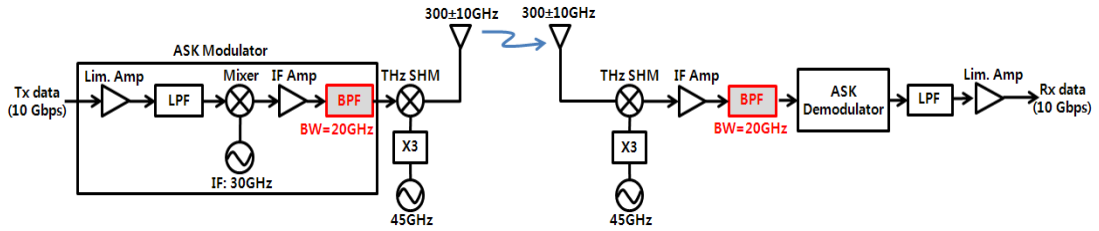


그림 1. 10 Gb/s 전송을 위한 THz 송수신기 구조
Fig. 1. THz transmitter and receiver architecture for 10 Gb/s Transmission

폭이 필요하며, 이러한 대역폭은 100 GHz 이상의 캐리어 주파수, 즉 THz 대역에서 용이하게 얻을 수 있다.

최근의 THz 대역 RF MMIC의 기술개발 동향을 고려해 볼 때 무선통신시스템 응용을 위한 가장 유력한 주파수 대역은 H-밴드(220~325 GHz)이다. H-밴드에서 가용한 주파수 대역폭은 약 45 GHz 이상이며, 이러한 초광대역폭을 이용하여 10 Gb/s급 이상의 데이터 전송속도를 ASK 또는 BPSK(Binary Phase Shift Keying)와 같은 간단한 변조방식으로 용이하게 실현할 수 있다^[4]. ASK 변조 방식의 경우, 10 Gb/s급 데이터를 전송하기 위해서는 20 GHz의 대역폭이 필요하다.

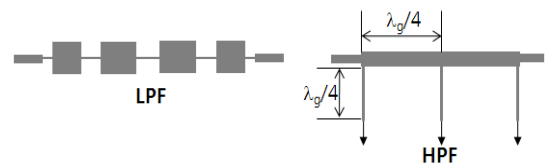
본 논문은 그림 1과 같이 10 Gb/s 데이터 전송을 위한 THz 송수신기에서 IF 대역에 이용되는 초광대역 BPF의 설계 및 구현에 관하여 기술한 것이다. 구현한 BPF는 IF 대역 ASK 변조기 출력과 THz 수신기의 ASK 복조기 앞단에 위치한다. 광대역 특성을 갖는 종래의 BPF들은 3.1~10.6 GHz 대역의 UWB(Ultra Wide-band) 통신시스템에서 많은 연구결과가 발표되어 있으며, 다중 모드(multiple mode) 공진기를 이용한 설계^[5]와 변형된 HPF(high-pass filter)의 등가 회로를 분산 소자로 구성한 설계^[6] 등이 있다. 또한, 밀리미터파 대역에서는 CPW(Coplanar Waveguide) 기술을 이용하여 개방회로 및 단락회로 스테브와 직렬로 연결된 임피던스 선로들로 구성되었다. 이 경우 통과대역 내 평탄도 특성이 좋지 않고, 비대칭 특성이 현저히 발생한다^[7].

본 논문은 이러한 광대역 CPW BPF의 문제점을 해결하고, 단순히 LPF와 HPF를 직렬 연결한 BPF(direct cascaded BPF)의 통과대역 평탄도 특성을 개선하기 위하여 합성 마이크로스트립 BPF(Composite microstrip BPF) 구조를 설계하였다. 설계한 마이크로스트립 BPF는 스텝 임피던스 LPF와 합성 $\lambda_g/4$ 단락 스테브로 제

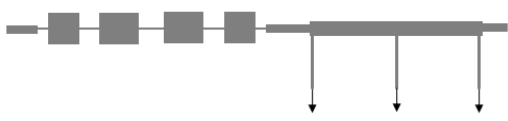
작되었으며, 스텝 임피던스 LPF는 BPF의 상위 저지대역을 감쇠시키기 위해 사용되며, 합성 $\lambda_g/4$ 단락 스테브는 하위 저지대역을 감쇠시키기 위해 사용된다. 본 논문에서는 직렬 연결 BPF와 합성 BPF의 두 가지 특성을 비교 분석하기 위하여 시뮬레이션을 통한 설계와 실제 제작을 통하여 측정하였다. 합성 BPF의 측정 결과는 직접 연결BPF보다 대역 통과 특성이 상당히 개선되었으며, 중심주파수 30 GHz에서 삽입손실은 0.65 dB, 10 GHz와 50 GHz에서 저지 특성은 각각 -10 dB와 -16 dB이며, 20~40 GHz 통과대역에서 평탄도는 ± 0.5 dB로 측정되었다.

II. 합성 BPF의 설계

그림 2는 LPF와 HPF를 직렬 연결한 BPF와 합성 BPF의 구조이다. 스텝 임피던스 LPF는 매우 높고, 낮은 특성 임피던스 선로로 구성되어 있고, HPF는 임피던스 인버터(impedance inverter)처럼 동작하는 $\lambda_g/4$ 선로와 $\lambda_g/4$ 단락 스테브로 구성되어 있다. 여기서 λ_g 는 설계대역의 중심주파수 f_0 에서의 관내 파장(guide wavelength)이다. 중심주파수 30 GHz, 대역폭 20 GHz의 BPF 설계 목표를 만족하기 위한 LPF 차단주파수는 40 GHz, HPF 차단주파수는 20 GHz이다.



(a) 저역통과필터와 고역통과필터 구조
(a) LPF and HPF architecture



(b) 직렬 연결 대역통과필터
(b) Direct cascaded BPF



(c) 합성 대역통과필터
(c) Composite BPF

그림 2. 대역통과필터 구조
Fig. 2. BPF architecture

1. 스텝 임피던스 LPF

스텝 임피던스 LPF를 설계하기 위한 각 선로 길이는 다음과 같이 식 (1)과 (2)로 주어진다^[8].

$$Length(L) = \left(\frac{cL}{Z_{hi} \sqrt{\epsilon_{hi, eff}}} \right) \quad (1)$$

$$Length(C) = \left(\frac{cCZ_{low}}{\sqrt{\epsilon_{low, eff}}} \right) \quad (2)$$

여기서, L 과 C 는 포트 임피던스(port impedance)와 차단주파수에 의해 계산된 LPF 원형(prototype)의 인덕턴스와 커패시턴스 값이고, c 는 자유공간에서의 빛의 속도이다. $\epsilon_{hi, eff}$, $\epsilon_{low, eff}$ 는 인덕턴스와 커패시턴스의 특성 임피던스(Z_{hi} , Z_{low})의 유효 유전 상수이다.

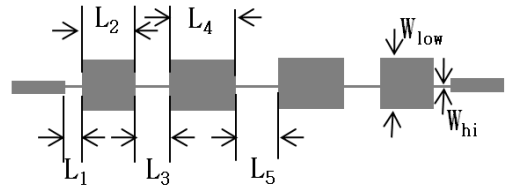
2. HPF

HPF는 임피던스 인버터와 단락 스테브의 ABCD 파라미터로 주어진다. 임피던스 인버터의 ABCD 파라미터는 식 (3)과 같고, 단락 스테브의 ABCD 파라미터는 식 (4)와 같다^{[8],[9]}.

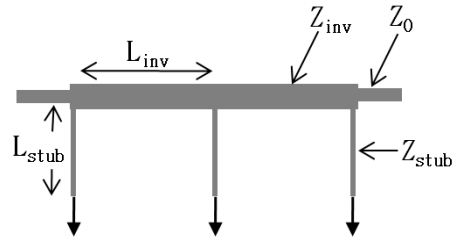
$$\begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}_{inv} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right) & jZ_{inv}\sin\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right) \\ jY_{inv}\sin\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right) & \cos\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}_{stub} = \begin{bmatrix} -j & 0 \\ \frac{1}{Z_{stub}} \cot\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, Z_{inv} , Z_{stub} 는 특성 임피던스이고, 스테브의 길이는 광대역 설계가 가능하도록 $f_0 = 30 GHz$ 에서 계산하였다. 설계된 필터의 차수를 그림 3에 나타내었다. 여기서, $L_1 = 0.26 mm$, $L_2 = 0.85 mm$, $L_3 = 0.5 mm$, $L_4 = 0.85 mm$, $L_5 = 0.6 mm$, $W_{low} = 0.8 mm$, $W_{hi} = 0.05 mm$ 이고, $L_{stub} = 2.0 mm$, $L_{inv} = 2.0 mm$, $Z_{stub} = 130 \Omega$, $Z_{inv} = 46 \Omega$ 이다.



(a) 저역통과필터의 치수
(a) Dimension of LPF



(b) 고역통과필터의 치수
(b) Dimension of HPF

그림 3. 저역통과필터와 고역통과필터의 치수
Fig. 3. Dimension of LPF and HPF

3. 합성 BPF의 설계 방법

합성 BPF의 설계 방법은 그림 4와 같다. 그림 4(a)에 서와 같이 $\lambda_g/4$ 임피던스 인버터는 두 개의 high-Z 구조와 하나의 low-Z 구조로 등가화 가능하고, 그림 4(b)에 서와 같이 $\lambda_g/2$ 임피던스 인버터는 두 개의 high-Z 구조와 두 개의 low-Z 구조로 등가화 가능하다. 이와 같은 방법으로 스텝 임피던스 LPF와 결합하여 BPF의 기능을 수행할 수 있다.

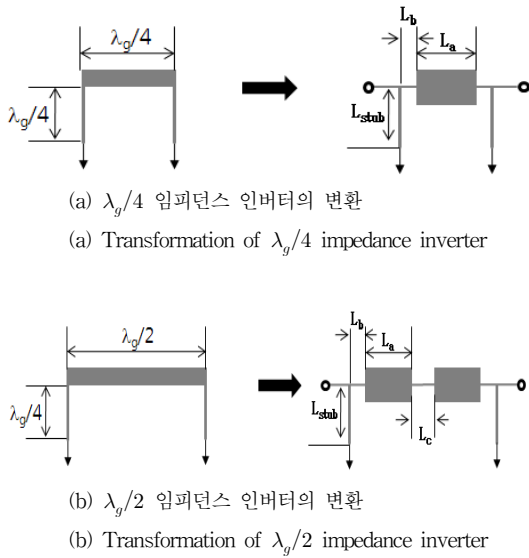
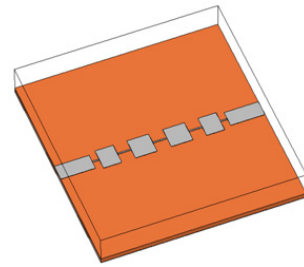


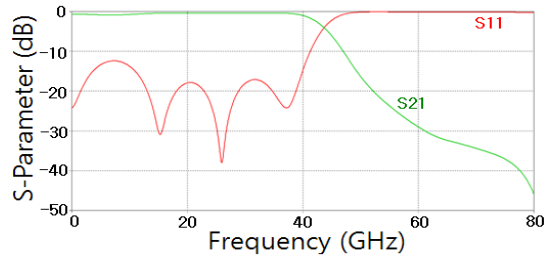
그림 4. 합성 필터의 설계 방법
Fig. 4. Design method of composite filters

III. 시뮬레이션

CST(Computer Simulation Technology)사의 3D 시뮬레이터인 MWS(MicroWave Studio)를 이용하여 시뮬레이션 하였다. MWS는 3D 상용 시뮬레이터로 3차원 구조의 전파 시뮬레이션에 이용된다^[10]. 차단주파수 40 GHz인 LPF와 차단주파수 20 GHz인 HPF 개별 시뮬레이션을 먼저 실행하고, LPF와 HPF를 직렬 연결 BPF와 합성 BPF를 서로 비교하였다. 그림 5는 설계된 LPF의 시뮬레이션 설계 구조와 S 파라미터 특성 결과이다. 구조는 스텝 임피던스 LPF 타입이고, 단수는 4단이다. 그림 5(b)의 S 파라미터 특성을 보면 차단주파수 40 GHz의 LPF의 특성을 보인다. 그림 6은 설계된 HPF의 시뮬레이션 설계 구조와 S 파라미터 특성 결과이다. HPF의 차단주파수는 20 GHz이고, 주기적인 응답 특성을 보인다. DC에서 $2f_0$ 까지는 BPF와 같은 특성을 보이며, 중심주파수 f_0 는 합성된 BPF 설계 시 통과대역 동작 특성을 만족하는 30 GHz에서 설계되었다.

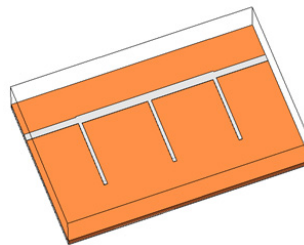


(a) 저역통과필터의 설계 구조
(a) Layout of LPF

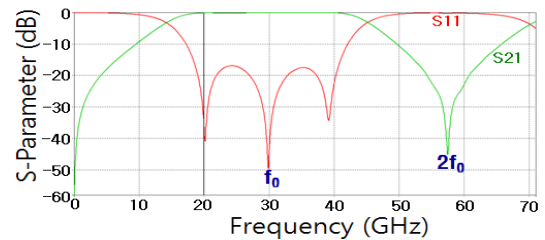


(b) S 파라미터 특성
(b) S-parameter characteristics

그림 5. 저역통과필터의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation results of LPF



(a) 고역통과필터의 설계 구조
(a) Layout of HPF

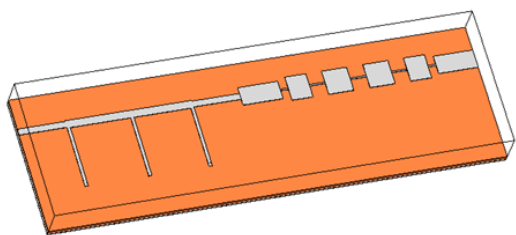


(b) S 파라미터 특성
(b) S-parameter characteristics

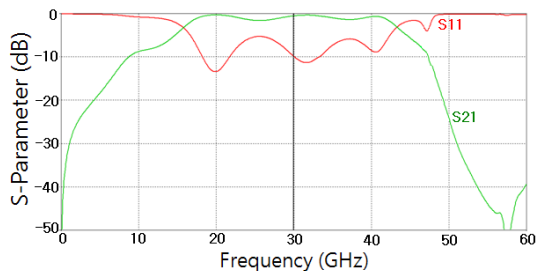
그림 6. 고역통과필터의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results of HPF

그림 7은 직렬 연결 BPF의 시뮬레이션 설계 구조와 S 파라미터 특성이다. 직렬 연결 BPF의 S 파라미터 특성을 보면 20 GHz 대역폭은 유지하나, 통과대역 평탄도 특성이 좋지 못하고, 통과대역에서 S11 특성도 -10 dB 이상으로 매우 좋지 못하다. 그림 8은 합성 BPF의 치수, 시뮬레이션 설계 구조 및 S 파라미터 특성 결과이다. 합성 BPF의 치수를 그림 8(a)에 나타내었다.

여기서, $L_1 = 0.21\text{ mm}$, $L_2 = 1.0\text{ mm}$, $L_3 = 0.39\text{ mm}$, $L_4 = 0.9\text{ mm}$, $L_5 = 0.6\text{ mm}$, $W_{low} = 0.8\text{ mm}$, $W_{hi} = 0.05\text{ mm}$ 이고, $L_{stub} = 1.5\text{ mm}$ 이다.



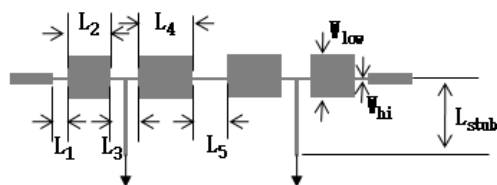
(a) 직렬 연결 대역통과필터의 설계 구조
(a) Layout of direct cascaded BPF



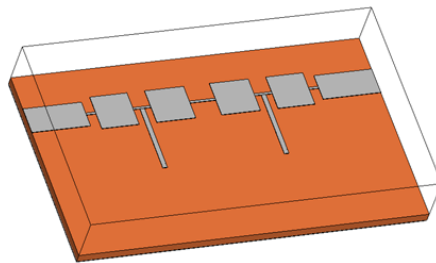
(b) S 파라미터 특성
(b) S-parameter characteristics

그림 7. 직렬 연결 대역통과필터의 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation results of direct cascaded BPF

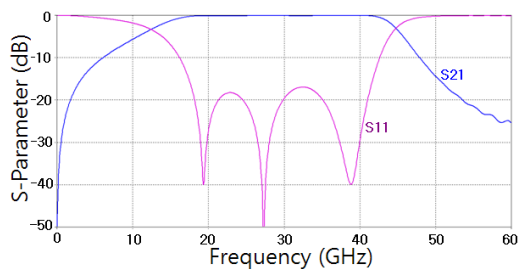
그림 8(c)의 S 파라미터 특성을 보면, 중심주파수 30 GHz에서 20 GHz 대역폭을 유지하고, S11 특성도 -30 dB 이하로 잘 떨어지는 것을 확인하였다. 시뮬레이션으로 판단해 보면 합성 BPF는 통과대역 평탄도, 광대역 대역폭, S11 등의 특성을 만족하여 10 Gb/s ASK 무선통신 송수신기에 적용 가능하리라 판단된다.



(a) 합성 대역통과필터의 치수
(a) Dimension of composite BPF



(b) 합성 대역통과필터의 설계 구조
(b) Layout of composite BPF



(c) S 파라미터 특성
(c) S-parameter characteristics

그림 8. 합성 대역통과필터의 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation results of composite BPF

IV. 실험 측정 결과

LPF와 HPF를 직렬 연결한 BPF와 합성된 BPF를 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작하고 측정하였다. 그 결과를 그림 9와 그림 11에 나타내었다. 직렬 연결 BPF의 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교해 보면, 그림 9(b)와 같이 중심주파수 30 GHz, 대역폭 20 GHz의 특성을 보이나, 통과대역에서 5 dB의 삽입손실(insertion loss)이 발생한다. 또한, S11 특성은 -10 dB 이상으로 매우 좋지 않으며, 통과대역 평탄도(flatness) 특성은 중심주파수를

중심으로 좌우 비대칭 특성을 보인다. BPF의 통과대역 평탄도 특성은 10 Gb/s 전송을 위한 30 GHz ASK 변조기의 출력 스펙트럼에 매우 큰 영향을 준다. 따라서, 30 GHz ASK 변조기에 직렬 연결 BPF를 실장하여 최종 출력 스펙트럼을 측정하였으며, 그 결과는 그림 10과 같다. 그림 10은 대역 평탄도를 측정하는 것으로 신호 발생기 (signal generator)로부터 0.1 GHz에서 10 GHz의 CW(Continues Wave) 신호를 30 GHz ASK 변조기에 입력으로 사용하여 출력 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과 직렬 연결 BPF의 평탄도가 30 GHz 중심주파수를 기준으로 좌우 비대칭인 특성으로 인해 30 GHz 이후 스펙트럼이 BPF의 평탄도 특성처럼 저하되었다. 그림 11에는 통과대역의 평탄도 특성을 향상시키기 위해 합성 BPF를 제작하여 측정하는 결과를 나타내었다. 합성 BPF는 측정 결과, 20~40 GHz 통과대역에서 평탄도와 S 파라미터 특성이 개선되었다.

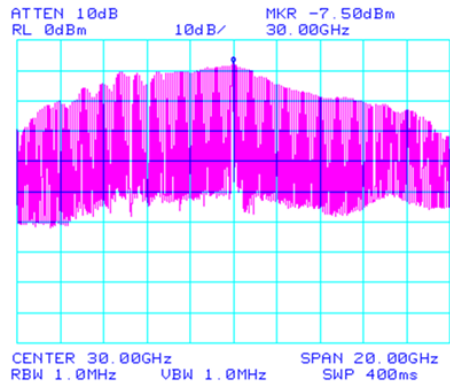
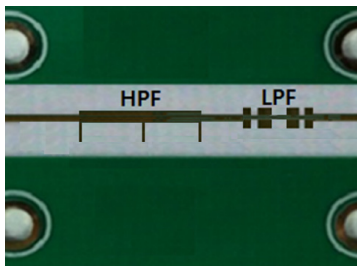
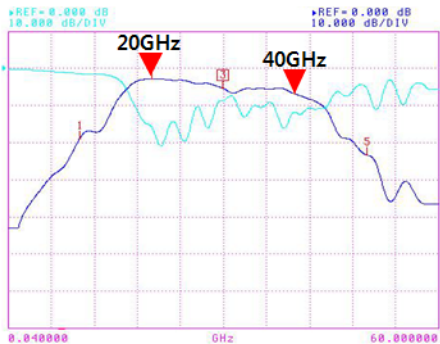


그림 10. ASK 변조기의 대역 평탄도
Fig. 10. BW flatness of ASK modulator

합성 BPF의 측정 결과, IF 주파수 30 GHz에서의 삽입 손실은 0.65 dB, 10 GHz와 50 GHz에서 저지 특성은 각각 -10 dB와 -16 dB이며, 20~40 GHz 통과대역에서의 평탄도는 ± 0.5 dB로 측정되어 설계 사양을 만족하였다.

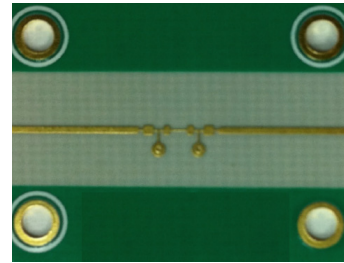


(a) 제작된 대역통과필터의 사진
(a) Photograph of fabricated BPF

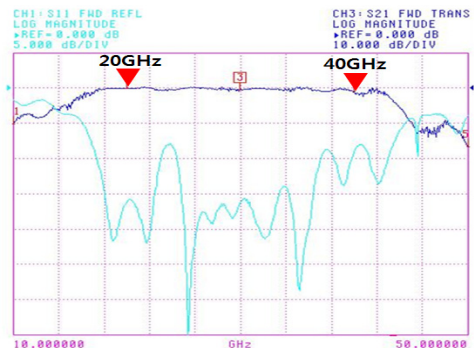


(b) 측정된 S 파라미터
(b) Measured S parameter

그림 9. 직렬 연결 대역통과필터의 측정결과
Fig. 9. Measurement results of direct cascaded BPF



(a) 제작된 대역통과필터의 사진
(a) Photograph of fabricated BPF



(b) 측정된 S 파라미터
(b) Measured S parameter

그림 11. 합성 BPF의 측정결과
Fig. 11. Measurement results of composite BPF

V. 결 론

본 논문은 합성 BPF와 직접 결합 BPF를 제작하여 특성을 측정하였다. 합성 BPF의 평탄도는 20~40 GHz의 통과대역에서 ± 0.5 dB이고, 직접 결합 BPF의 평탄도는 20~40 GHz의 통과대역에서 ± 2 dB로 합성 BPF가 직접 결합 BPF에 비해 평탄도가 개선되었다. 3 dB 대역폭은 두 필터 모두 중심주파수 30 GHz에서 67 %로 측정되었다.

합성 BPF는 10 Gb/s 전송을 위한 THz ASK 송신기의 IF BPF와 THz 수신기의 IF BPF의 통과대역 평탄도와 3 dB 대역폭 성능을 만족하므로, THz 송수신기 시스템에 집적화하면 10 Gb/s 전송에 적합하다.

참 고 문 헌

- [1] 이원희, 정태진, "300GHz 대역 1.5Gbit/s 무선 데이터 전송 시스템 구현", 한국인터넷방송통신학회 논문지, 제11권, 제2호, pp. 1-6, 2011년 4월.
- [2] H. J. Song et al., "8Gbit/s Wireless Data Transmission at 250GHz", *Electronics Letters* 22nd, Vol. 45, No. 22, pp. 1121-1122, Oct. 2009.
- [3] C. Jastrow, et al., "300GHz Transmission System", *Electronics Letters* 31st, Vol. 44, No. 3, pp. 213-214, Jan. 2008.
- [4] 정태진, "THz 대역의 무선통신시스템 기술", 한국통신학회지, 제 27권, 제 2호, pp. 20-26, 2010년 2월.
- [5] L. Zhu, S. Sun, and W. Mensel, "Ultra-wideband (UWB) Bandpass Filters using Multiple-mode Resonator", *IEEE Microwave Wireless Component Letter*, Vol. 15, No. 11, pp. 796-798, Nov. 2005.
- [6] 안재민, 김유선, 표현성, 이혜선, 임영석, "우수한 차단 대역 특성과 대역 내에 저지 대역을 갖는 UWB 대역 통과 필터 설계", 한국전자과학회논문지, 제 21권, 제 1호, pp. 28-35, 2010년 1월.
- [7] C. H. Doan, S. Emami, A. M. Niknehad, R. W. Brodersen, "Millimeter-Wave CMOS Design",

IEEE Journal of Solid-State Circuits", Vol. 40, No. 1, pp. 144-155, Jan. 2005.

- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineer*, New York: John Wiley & Sons, 2nd Edition, Ch. 8, 1998.
- [9] P. Jarry, J. Beneat, *Advanced Design Techniques and Realizations of Microwave and RF Filters*, John Wiley & Sons, Ch. 3, 2008.
- [10] 문성진, 신동식, 윤힘찬, 박위상, "전파를 이용한 철산화물 스케일 박막 특성 연구", 한국인터넷방송통신학회 논문지, 제 9권, 제 3호, pp. 55-60, 2009년 6월.

※ 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [K1002056, 테라헤르츠 대역 전파환경 및 무선전송 플랫폼 기술연구].

저자 소개

이 원 희(정회원)



- 2000년 : 건국대학교 전자정보통신공학과, 공학석사
 - 2003년 : 건국대학교 전자정보통신공학과, 공학박사
 - 1998년 ~ 1999년 : 건국대학교 전자정보통신공학과, 교육조교
 - 1999년 : 전자부품연구원 고주파재료 연구센터, 위촉연구원
 - 2002년 ~ 2008년 : LG전자 디지털어플라이언스연구소, 책임연구원
 - 2008년 ~ 2009년 : 포항공과대학교 전자전기공학과, Post Doc.
 - 2009년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문, 선임연구원
- <주관심분야 : Dielectric Loaded Resonators, Microstrip Antennas, Microwave Plasma Applications, EMI/EMC, Channel Modeling, THz Communication Systems>

정 태 진(정회원)



- 1979년 : 충남대학교 전자공학과, 공학사
 - 1979년 ~ 1983년 : 국방과학연구소, 연구원
 - 1983년 ~ 1984년 : 대우중공업(주), 대리
 - 1990년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 공학석사
 - 2004년 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 공학박사
 - 1984년 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송통신융합연구부문, 책임연구원
- <주관심분야 : 마이크로파 및 밀리미터파 RF/IF 시스템 설계, 통신시스템 기저대역(BB) 모델 설계>