

W-Band 다이오드 검출기 설계

Design of W-Band Diode Detector

최지훈 · 조영호 · 윤상원 · 이진구*

Ji-Hoon Choi · Young-Ho Cho · Sang-Won Yun · Jin-Koo Rhee*

요 약

본 논문에서는 저잡음 증폭기와 무바이어스 쇼트키 다이오드를 사용하여 W-Band에서 동작하는 밀리미터파 다이오드 검출기를 설계, 제작하였다. 향상된 감도 특성을 얻기 위해 다이오드 검출기는 검출기와 저잡음 증폭기로 구성된다. 저잡음 증폭기단은 발진을 제거하기 위해, 높은 저지 대역 특성을 갖도록 설계된 하우스에 저잡음 증폭기 MMIC 칩을 사용해 제작한다. 다이오드 검출기단은 단순한 구조를 사용하기 위해 무바이어스 쇼트키 다이오드를 사용하고, 저잡음 증폭기단과의 연결을 용이하도록 하기 위해 평면형으로 설계한다. 설계 및 제작된 W-band 검출기는 입력 전력 $-45 \sim -20$ dBm의 변화에 대하여 20~500 mV의 출력 전압을 얻었다. 본 검출기는 수동 밀리미터파 영상 시스템에 적용할 수 있다.

Abstract

In this paper, a millimeter-wave detector using zero-bias schottky diode is designed and fabricated at W-band. It consists of LNA(Low Noise Amplifier) and detector module to improve sensitivity. LNA case with a highly stop-band characteristic is designed to prevent the oscillation by LNA MMIC chip. Diode detector of planar structure is fabricated for the easy connection with LNA module and zero bias Schottky diode is utilized. In practice, the fabricated diode detector have shown the detection voltage of 20~500 mV to the RF input power of $-45 \sim -20$ dBm. The proposed W-band detector can be applicable to the passive millimeter image system.

Key words : Diode Detector, Dynamic Range, Passive Imaging, Detection Voltage, Millimeter-Wave

I. 서 론

통신과 전파 센서 기술의 발달에 따라 각종 기기들의 출력 레벨을 감지하는 신호의 검출은 지난 20년간 소형화되고, 고신뢰도를 갖는 소자로 자리를 잡았다. 일반적으로 검출기는 다이오드나 트랜지스터와 같은 반도체 소자의 비선형 특성을 사용하여 입력 마이크로파 신호에 대하여 출력에서 발생하는 직류 성분 및 고조파 성분 중, 입력 신호의 크기에 비례하는 직류 성분을 검출하는 소자이다^[1]. 밀리미터

파 대역 수신기에서는 다이오드 검출기가 저잡음 증폭된 신호를 검출하는 것이 보통이며, 최근에 수동형 밀리미터파 영상 시스템에서도 이러한 검출기가 요구되고 있다. 검출기를 구성하는데 있어서 무바이어스 쇼트키 다이오드 검출기가 가장 실제적이며 경제적으로 판단되고 있다^[2]. 우선 가격, 크기 및 전력 소모가 적다는 면에서 유리하며, 그 구성이 복잡하지 않으면서 별 다른 부가회로가 없이 바로 디지털 회로로 적용할 수 있다는 점이 높이 평가된다. 그러나 여기서 문제는 다이오드의 선형적인 동작 범

「이 연구는 2009학년도 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 연구되었음.」

서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

*동국대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Dongguk University)

· 논문 번호 : 20091116-137

· 교신저자 : 최지훈(e-mail : bluetooth@naver.com)

· 수정완료일자 : 2009년 12월 23일

위가 20 dB 내외이므로, 낮은 입력 전력을 검출 못하는 단점이 있다. 이는 직접 검출 방식의 장점을 저하시키는 요인이 되고 있다.

이러한 문제를 개선시키기 위해서 저잡음 증폭기를 이용하여 입력 신호를 증폭시켜 검출기의 감도 특성을 향상시키는 방법이 쓰인다^[3].

본 논문에서는 밀리미터파 주파수 대역인 94 GHz 에서 동작하는 다이오드 검출기 회로를 설계하였고, 잡음 특성을 향상시키기 위해서 무바이어스 쇼트키 다이오드를 사용하였다. 검출기의 감도 특성을 향상시키기 위해 MMIC 저잡음 증폭기를 사용하여 -45 ~ -20 dBm의 동작 특성을 갖는 검출기를 설계, 제작 하였다. 이득이 비교적 큰 저잡음 증폭기를 사용 하여야 하므로 요구되는 성능은 물론 하우징 설계시 발전을 억제하는 데도 설계의 주안점을 두었다.

II. 설계 이론

2-1 검출기의 동작 원리

검출기는 반도체 소자의 비선형성을 이용한다. 다이오드의 출력 신호에 Fourier 분석을 이용하면 입력 주파수 성분뿐만 아니라 DC와 고차 주파수 성분이 나타난다. 다이오드의 직류 전압과 전류 관계는 식 (1)과 같다^[4].

$$\begin{aligned}
 i &= I_s(e^{aV_j} - 1) \\
 i &= i(V_0) + \delta V \left. \frac{di}{dv} \right|_{I_0} + \frac{\delta V^2}{2!} \left. \frac{d^2i}{dv^2} \right|_{I_0} + \\
 &\dots + \frac{\delta V^n}{n!} \left. \frac{d^ni}{dv^n} \right|_{I_0} \\
 \delta V &= V_p \cos \omega_c t \\
 \Delta i &= \frac{V_p^2}{4} [1 + \cos(2\omega_c t)] \left. \frac{d^2i}{dv^2} \right|_{I_0} \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)은 직류와 고차 주파수 성분으로 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 이 성분들 중 고차 주파수 신호를 제외한 직류 성분을 이용하여 검출기를 제작하게 된다. 일반적인 다이오드 검출기는 그림 1과 같은 구조를 가지게 된다. 정합 회로는 저잡음 증폭기 단과 다이오드 간에 임피던스 정합을 위해 사용되며, 인덕터 L 은 다이오드의 회귀 역할을 한다. C_b, R_L 과 저역 통과 대역 여파기는 고주파 성분을 제거하

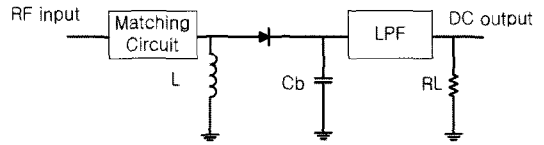


그림 1. 일반적인 다이오드 검출기 회로
Fig. 1. The conventional diode detector circuit.

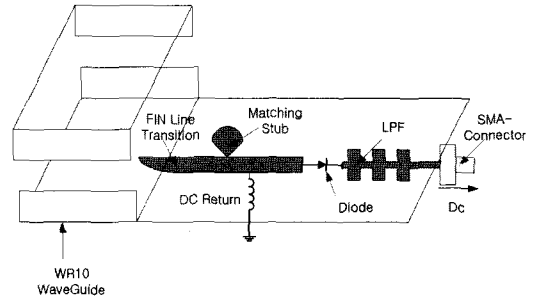


그림 2. 제안된 다이오드 검출기의 구조
Fig. 2. The structure of the proposed diode detector.

는 역할을 한다.

III. 설 계

3-1 다이오드 검출기의 설계

94 GHz 대역의 무바이어스 쇼트키 다이오드 검출기를 제작하기 위한 구조는 그림 2와 같다. 다이오드는 Virginia사의 쇼트키 다이오드를 사용한다.

다이오드 검출기의 입력단은 WR-10의 도파관을 사용한다. 도파관 신호를 마이크로스트립 신호로 전이하기 위해서 antipodal fin line 전이 구조를 사용한다. 쇼트키 다이오드의 임피던스에 정합을 위해서 그림 2와 같이 스텐드 형태의 정합 구조를 사용한다. 스텐드 형태의 정합 구조는 넓은 대역에서 정합이 용이하다는 장점이 있다. 정류된 신호의 고주파 성분을 제거하기 위해 마지막 단에 계단형 임피던스 저역 통과 여파기를 사용한다. 그리고 SMA 커넥터를 통해서 고주파 성분이 제거된 직류 신호를 출력하게 된다.

WR-10 도파관 신호에서 마이크로스트립 구조의 신호로 전이시키기 위해서는 넓은 대역에서의 Fin 라인 전이 구조가 필요하다^[5]. 검출기에서 사용된 전이 구조는 antipodal fin 라인 구조이다. 도파관의 E-

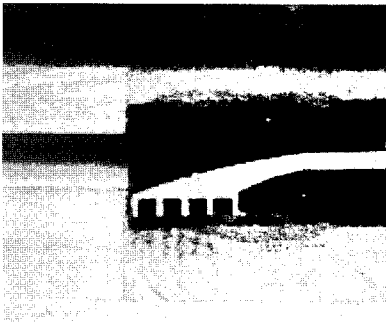


그림 3. 도파관-마이크로스트립 전이 구조의 사진
Fig. 3. The photograph of waveguide-to-microstrip transition.

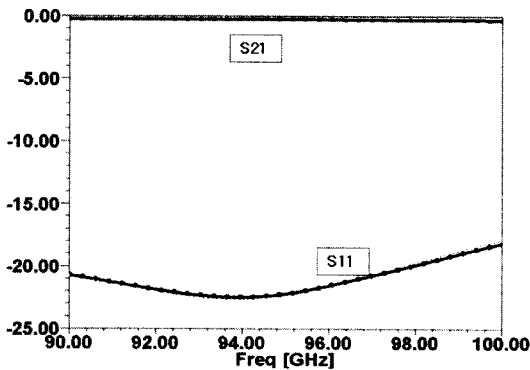


그림 4. Fin line 전이 구조 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulated results of waveguide-to-microstrip transition.

평면에 삽입된 기판이 전기장을 90도 회전시켜 변환이 이루어진다. WR-10 도파관의 전기장은 TE₁₀ 모드로서 fin 라인 구조를 거치면서 전기장이 회전하게 된다. 그림 3은 antipodal fin 라인 전이 구조의 위에서 바라본 사진이다.

그림 4는 안소프트사의 HFSS로 이루어진 fin 라인 전이 구조의 시뮬레이션 결과이다. 그림 4에서 보면 90~100 GHz에서의 삽입 손실은 0.5 dB 이하이고, 반사 손실은 -20 dB 이상으로서 원하는 주파수 대역에서 도파관에서 마이크로스트립 전이가 이루어짐을 알 수 있다.

3-2 저잡음 증폭기의 설계

검출기의 감도 특성이 높을수록 입력 신호에 따른 출력 전압의 변화 특성이 향상되게 된다. 기존의 다이오드 검출기의 동작 감도는 20 dB 이내이다. 본

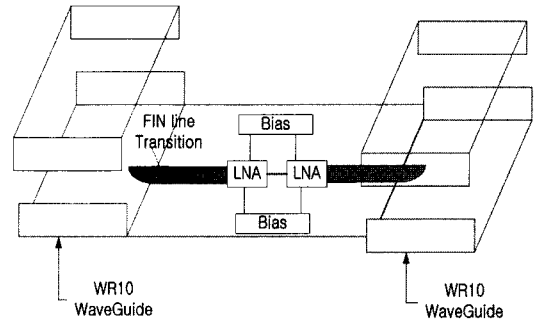


그림 5. 저잡음 증폭기의 구조
Fig. 5. The configuration of low noise amplifier.

논문에서는 동작 감도의 향상을 위해서 저잡음 증폭기를 사용하였다. 그림 5에서 이용된 MMIC는 Grumman사의 ALH504이다. 저잡음 증폭기의 전체 구조는 그림 5와 같다.

저잡음 증폭기를 2단으로 구성하기 위해서 2개의 MMIC 칩이 사용된다. 이득 감쇄를 최소화하기 위해서 50 ohm 선로의 길이는 200 um 내외로 하였고, 전이 구조와 MMIC 사이의 리본 본딩 길이를 5 um가 넘지 않도록 하였다.

저잡음 증폭기를 구성함에 있어 하우징과 도파관-마이크로스트립 전이 구조의 특성에 따라서 성능이 결정된다. 저잡음 증폭기의 하우징은 발진 현상이 없어야 하고 내부의 바이어스 라인이나 MMIC 칩에 영향을 주지 않는 형태로 설계되어야 한다. 증폭기를 구성할 때 이득이 높아지면 발진 현상이 발생하게 되는데, 특히 주파수가 높을수록 이러한 현상이 많이 발생하게 된다. 사용된 MMIC의 이득 특성이 80 GHz 대역에서 20 dB이고, 90 GHz 대역에서는 15 dB 내외이다. 두 대역이 5 dB 이득차가 생기므로, 상대적으로 80 GHz 대역에서의 발진 특성이 나타날 수 있다.

본 논문에서는 저잡음 증폭기부에서 발생하는 발진을 제거하기 위해서 그림 6과 같이 계단형의 천정을 가진 하우징을 구성한다. 그림 6은 저역 통과 여파기의 저지 대역을 사용하는 구조로서 이러한 구조를 사용할 경우 원하는 대역에서 높은 저지 대역 특성을 얻을 수 있다. 따라서 발진을 일으킬 수 있는 피드백을 차단시켜 저잡음 증폭기를 안정적으로 동작시키는 데 효과적이다. 그림 7의 그림은 저잡음 증폭기 하우징을 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 7(a)

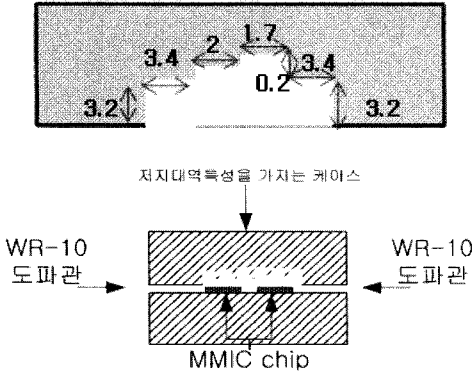


그림 6. 제안된 저잡음 증폭기 하우징의 측면도
 Fig. 6. The side view of the proposed low noise amplifier housing.

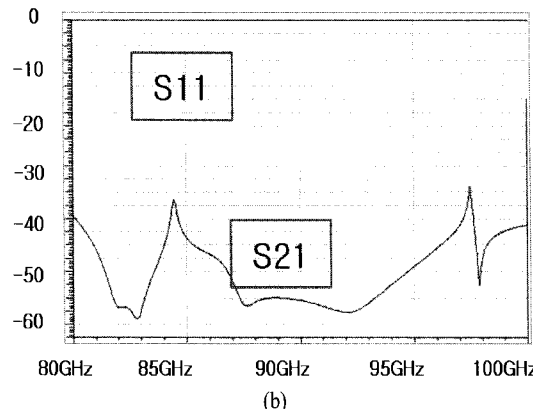
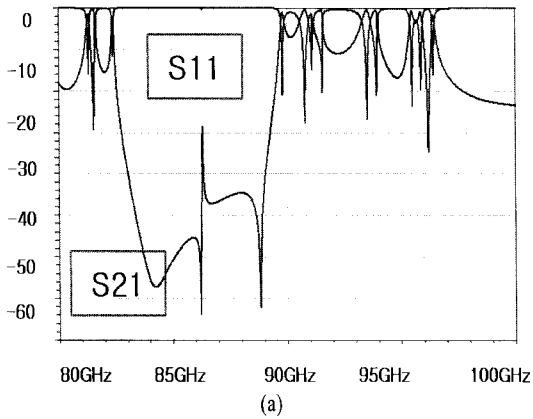


그림 7. (a) 저역 통과 여파기가 없는 하우징의 시뮬레이션 결과, (b) 저잡음 증폭기 하우징 시뮬레이션 결과
 Fig. 7. (a) The simulated result of low noise amplifier case without a lowpass filter, (b) the simulated result of low noise amplifier housing with a lowpass filter.

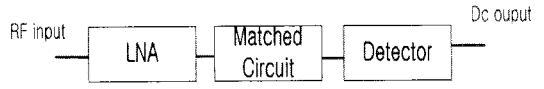


그림 8. W-band 검출기 블록도
 Fig. 8. Block diagram of W-band detector.

의 시뮬레이션 결과는 저역 통과 여파기가 없는 일반적인 구조의 하우징을 시뮬레이션한 결과이고, 그림 7(b)의 시뮬레이션 결과는 그림 6 구조의 하우징을 시뮬레이션 한 결과이다. 안정적인 저잡음 증폭기를 설계하기 위해서는 하우징 자체의 공진이 없어야 한다. 그림 7(a)의 시뮬레이션 결과는 82 GHz 대역과 90 GHz 대역에서 공진점이 생기므로 하우징으로 사용하기에는 적합하지 않다. 반면에 그림 7(b)의 시뮬레이션 결과는 80~100 GHz에서 공진점 없이 -40 dB 이상을 가짐으로써 하우징으로 사용하기에 적합하다.

검출기의 감도를 향상시키기 위해서는 그림 2에서 설계된 다이오드 검출기와 저잡음 증폭기를 연결하여 구성한다. 그림 8은 연결한 검출기의 블록도이다. Matched circuit 회로는 그림 2에서 제안된 스테르브 형태의 회로를 구현하였다. 검출기 자체의 동작 범위가 -25 dBm이고, 저잡음 증폭기의 이득이 20 dB이므로 최대 감도 -45 dBm에서 동작하는 검출기가 완성된다.

IV. 제작 및 측정

설계된 W-Band 능동 검출기는 두께가 5 mil인 Duroid 5880 기판을 사용하여 제작하였고, Anritsu 사의 ME7808B network analyser를 사용하여 특성을 측정하였다.

Fin 라인 전이 구조 제작한 결과를 보면 그림 9와 같은 삽입 손실 특성을 얻는다.

전이 구조의 특성을 보면 94 GHz 대역에서 반사 손실이 -30 dB이고, 삽입 손실이 -1.5 dB이므로 WR-10의 도파관 구조에서 마이크로스트립 구조로 전이되는데 문제가 없음을 확인할 수 있다.

그림 2에서 스테르브 형식의 정합 회로를 사용하여 제작된 다이오드 검출기의 입력 임피던스 특성은 그림 10과 같다. 제작된 다이오드 검출기는 94 GHz에서 반사계수가 10 dB 정도로 측정되었다.

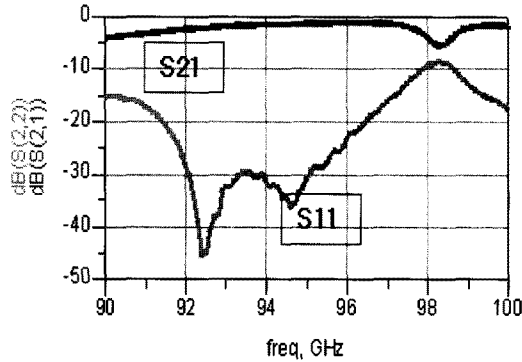


그림 9. Fin 라인 전이 구조의 측정 결과
Fig. 9. The result of fin line transition.

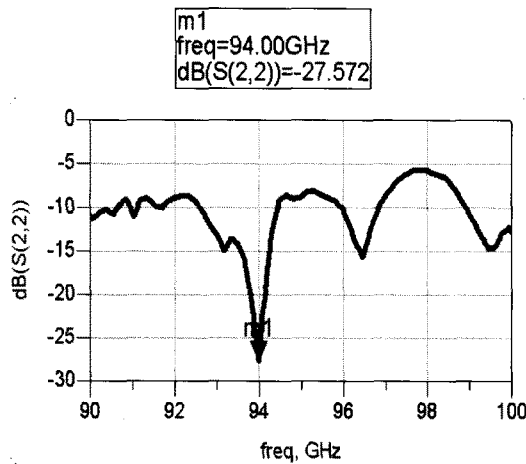


그림 10. 다이오드 검출기의 반사 특성
Fig. 10. The return loss characteristics of diode detector.

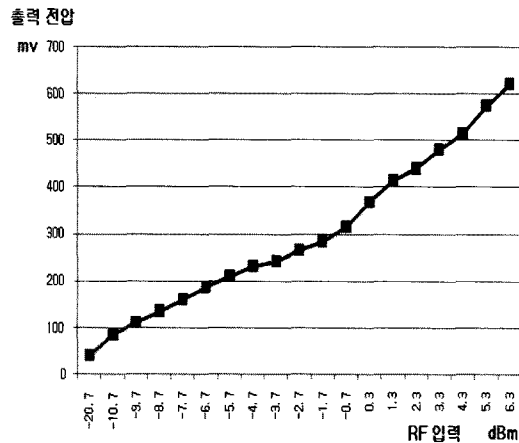


그림 11. 다이오드 검출기의 측정된 특성
Fig. 11. The measured results of the diode detector.

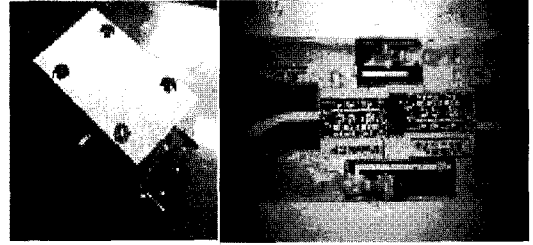


그림 12. 저잡음 증폭기
Fig. 12. Low noise amplifier.

그림 11은 검출기의 특성을 측정 한 결과이다. 검출기는 많은 입력 범위의 신호를 포함할 수 있어야 한다. 그림 10의 검출기 특성을 보면 -0 dBm 근처에서 약간의 비선형성적 형태는 온도 특성이나 다이오드 자체의 특성에 따른 것이다. 전체적으로 보면 -20 dBm 부터 6 dBm 까지에서 30 mV 부터 600 mV 까지 입력 신호에 비례해서 출력 전압이 변함을 알 수 있다.

그림 12와 같이 저잡음 증폭기는 2단의 MMIC와 fin 라인 전이 구조를 이용하여 제작하였다. 하우징 내부의 크기는 $17.5 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$ 이다. 구조상 그림 6의 저역 통과 여파기의 저지 대역을 사용하는 하우징을 활용하여 제작한 사진이다. 그림 6의 저역 통과 여파기의 저지 대역 하우징 측정 결과는 그림 13과 같다.

사용하는 저잡음 증폭기 MMIC의 이득은 15 dB 이므로 2단의 발진을 막기 위해 하우징이 가져야 할 저지 특성은 -30 dB 이하가 되어야 한다. 그림 13의

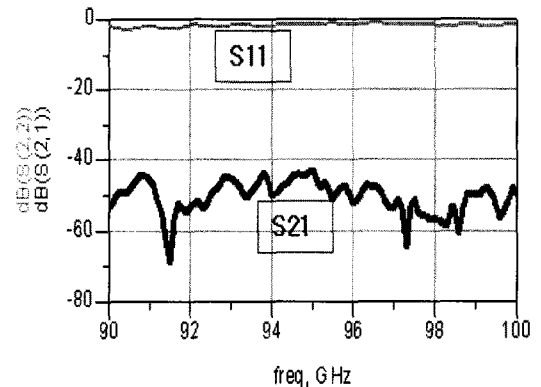


그림 13. 저잡음 증폭기 하우징 전달 특성 결과
Fig. 13. The result of LNA housing transmission characteristics.

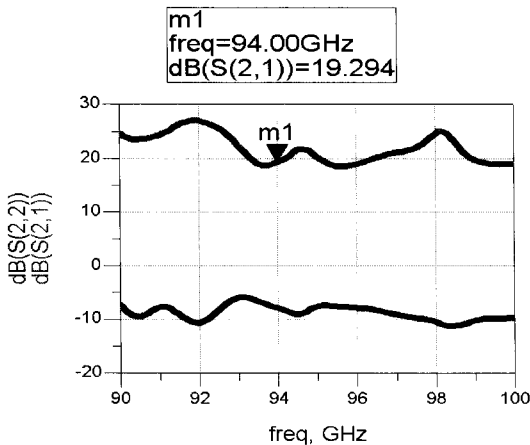


그림 14. 저잡음 증폭기 측정 결과
Fig. 14. The result of low noise amplifier.

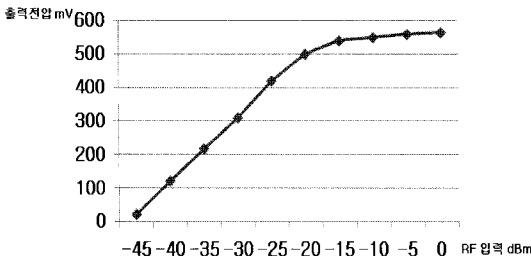


그림 15. 최종 검출기 측정 결과
Fig. 15. The result of diode detector.

결과를 통해, 저잡음 증폭기의 사용 대역인 90~100 GHz에서 삽입 손실이 -40 dB 이하인 것을 알 수 있다. 그러므로 발진을 막는데 효과적으로 제작되었음을 알 수 있다.

2단 저잡음 증폭기의 측정 결과는 그림 14와 같다. W-band 대역인 90~100 GHz에서 발진 없이 이득이 19 dB 이상 측정되었다. 이론상 30 dB 이상의 특성이 나와야 하지만, 도파관-마이크로스트립 전이부, MMIC 사이와 검출부로 연결되는 50 ohm 선로와 와이어 본딩에서 발생하는 손실로 인하여 10 dB 정도의 손실이 발생하였기 때문이다.

제작된 저잡음 증폭기와 검출기를 그림 8과 같이 직접 연결하여 측정한 결과는 그림 15와 같다. 검출기의 감도가 20 dBm 증가함을 알 수 있다. 동작 범위는 -45 dBm에서 -20 dBm이고, 출력 전압은 20 mV에서 500 mV로써 입력 신호에 비례하여 출력 전압이 증가함을 확인할 수 있다.

또한 이득이 높은 저잡음 증폭기를 사용하거나 저잡음 증폭기 모듈을 직렬로 연결하면 동작 감도가 향상된 다이오드 검출기를 구현할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 W-band의 저잡음 증폭기를 이용하여 높은 동작 감도를 갖는 마이크로파 검출기를 제작하였다.

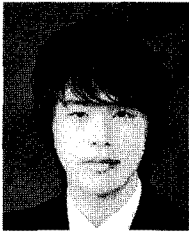
이에 본 논문에서는 94 GHz 수동 영상 시스템의 응용 분야에 쓰일 수 있도록, 검출할 수 있는 전력의 동작 범위가 넓고, 감도 특성이 좋은 무바이어스 검출기를 설계, 제작하였다. 특히 검출기의 동작 특성을 향상시키기 위하여 다이오드 검출기 앞단에 저잡음 증폭기를 연결함으로써 동작 감도를 45 dB로 향상시켰다.

앞으로는 더 넓은 대역폭을 가지며, 더 소형화된 설계가 요구되며, 온도 특성에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Sang-Won Lee, Hak-Sun Kim, and Hyung-Jae Lee, "A study on the temperature compensation of the zero bias power detector for 2.45 GHz RF/ID", 한국통신학회 학술발표회 논문집, 16(3), pp. 86-89, 1997년 1월.
- [2] W. J. Wilson, R. J. Howard, A. C. Ibbot, G. S. Parks, and W. B. Rikkets, "Millimeter-wave imaging sensor", *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, vol. 34, no. 10, pp. 1026-1035, Oct. 1986.
- [3] H. Wang, "A monolithic W-band pseudomorphic In-GaAs HEMT LNA", *IEEE MTT-S Dig.*, 1993.
- [4] 이하정, 김민지, 윤상원, "넓은 dynamic range를 갖는 800 MHz 대역 RF 검출기의 설계", 2001년도 추계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 24(2), pp. 21-24, 2001년 9월.
- [5] Frank J. Villegas, Stones D. Ian, and Hung H. Alfred, "A novel waveguide-to-microstrip transition for millimeter-wave module applications", *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, vol. 47, no. 1, pp. 48-55, Jan. 1999.

최 지 훈



2008년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 여파기, 초고주파 회로 설계

윤 상 원



1977년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1984년 5월: 미국 Texas 주립대학교 전자공학과 (공학박사)
1984년 9월~현재: 서강대학교 전자

공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로소자 및 RF 시스템

조 영 호



2005년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 주파수 합성기, 여파기, 마이크로파 시스템

이 진 구



1969년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학사)
1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1982년 5월: 미국 Oregon 주립대학교 전자공학과 (공학박사)
1985년 9월~2008년: 동국대학교 전

자공학과 교수

2009년~현재: 동국대학교 전자공학과 석좌교수
[주 관심분야] 반도체 소자 및 집적 회로