
비접촉 마이크로웨이브 프루브 시스템의 I/Q Demodulator를 위한 MMIC Mixer의 설계

류근관* · 김성찬**

A Design of MMIC Mixer for I/Q Demodulator of Non-contact
Near Field Microwave Probing System

Keun-Kwan Ryu* · Sung-Chan Kim**

이 논문은 2010년도 국립한밭대학교 교내학술연구비를 지원받았음

요 약

본 논문에서는 비접촉 마이크로웨이브 프루브 시스템의 I/Q demodulator를 위한 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) mixer chip을 GaAs p-HEMT 공정의 Schottky 다이오드를 이용하여 설계 및 제작하였다. 프루브 시스템의 I/Q demodulator 구조를 단순화하기 위해 single balanced 구조의 mixer를 채택하였다. Single balanced mixer에서 90° hybrid coupler와 $\lambda/4$ 전송선로를 이용하여 180° hybrid를 설계하였으며 이를 MIM 커패시터와 spiral 인덕터를 이용하여 구현함으로써 mixer chip의 크기를 줄일 수 있었다. On-wafer 측정 결과, 본 논문의 MMIC mixer는 1650MHz ~ 2050MHz의 RF 및 LO 주파수 대역을 포함하고 있으며, 응용 주파수 대역 내에서 RF 및 LO의 변화에 대해 약 12dB 이하의 평탄한 변환손실(conversion loss) 특성을 나타내었다. 또한, MMIC mixer chip은 2.5mm×1.7mm의 초소형 크기를 가지며 LO-IF 및 RF-IF의 격리도는 각각 43dB 및 23dB 이상의 특성을 나타내었다.

ABSTRACT

A MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) mixer chip using the Schottky diode of an GaAs p-HEMT process has been developed for the I/Q demodulator of non-contact near field microwave probing system. A single balanced mixer type is adopted to achieve simple structure of the I/Q demodulator. A quadrature hybrid coupler and a quarter wavelength transmission line for 180 degree hybrid are realized with lumped elements of MIM capacitor and spiral inductor to reduce the mixer chip size. According to the on-wafer measurement, this MMIC mixer covers RF and LO frequencies of 1650MHz to 2050MHz with flat conversion loss. The MMIC mixer with miniature size of 2.5mm×1.7mm demonstrates conversion loss below 12dB for both variations of RF and LO frequencies, LO-to-IF isolation above 43dB and RF-to-IF isolation above 23dB, respectively.

키워드

믹서, 단일평형, 벌룬, 마이크로스트립, MMIC

Key word

Mixer, Single Balanced, Balun, microstripline, MMIC

* 정회원 : 국립한밭대학교 전자 · 제어공학과
** 정회원 : 국립한밭대학교 전자 · 제어공학과 (교신저자 : sckim@hanbat.ac.kr)

접수일자 : 2012. 03. 27
심사완료일자 : 2012. 04. 25

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.5.1023>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

임의의 물질에 대한 특성을 측정하기 위해 매우 높은 Q(quality factor)를 갖는 공진회로(resonant circuit)를 이용한 near field 마이크로웨이브 프루브 시스템이 이용되고 있다. 일반적으로 near field 마이크로웨이브 프루브 시스템은 접촉식 및 비접촉식으로 구분되는데 그림 1에서는 비접촉 near field 마이크로웨이브 프루브 시스템의 기능적 구성도를 보여주고 있다. 매우 높은 Q값을 갖는 공진기에 의해 비접촉 프루브 시스템의 팁(tip)은 집중된 field를 갖게 되며, 샘플로부터 반사된 field는 저잡음 증폭기(LNA)를 거쳐 증폭된 후 I/Q demodulator에 입력되고, I/Q demodulator는 샘플로부터 필요한 정보를 추출하기 위한 신호를 검출하게 된다^[1].

한편, 마이크로웨이브 대역의 회로설계 기술은 상용 무선 통신 시스템의 발달과 더불어 급격하게 발전하여 왔다. 뿐만 아니라, 회로의 크기는 점점 더 소형화, 접적화되고 있는 실정이다. 그 중 RF 신호를 IF 신호로 혹은 IF 신호를 RF 신호로 주파수를 변환시키기 위한 mixer 회로는 마이크로웨이브 시스템의 성능을 결정하는 중요한 소자 중 하나이다. 최근에는 높은 주파수에서 다양한 송수신기의 응용을 위해 설계된 mixer 회로의 논문이 많이 보고되고 있다^[2-4].

일반적으로 mixer는 쇼트키(schottky) 다이오드 혹은 FET와 같은 비선형 소자의 비선형성을 이용하여 구현할 수 있으며, 특히 FET를 사용한 mixer는 다이오드 mixer에 비해 우수한 변환율 및 높은 TOI(third-order intercept)를 얻을 수 있는 장점이 있다. 반면에 다이오드를 사용한 mixer는 FET mixer와 비교하여 낮은 잡음지수, 간단한 구조 및 바이어스를 공급할 필요가 없다는 장점이 있다^[5].

본 논문에서는 near field 마이크로웨이브 프루브 시스템에 사용될 I/Q demodulator의 mixer를 설계하는 것이 주목적으로 기생 field (parasitic field)에 대한 영향을 최소화하기 위해 초소형의 회로크기가 요구되며, 바이어스 공급이 필요 없으면서 비교적 간단한 구조가 요구된다. 또한 공진 프루브 시스템의 크기를 급격히 줄이기 위해 MMIC 기술을 이용한 초소형의 mixer를 설계하는 것이 필요하다. 그리고 I/Q demodulator의 구조와 local oscillator의 출력 전력 등을 고려하여 single balanced 형태의 mixer구조를 선택하였다. 따라서 본 논문에서의 목

적은 이와 같이 다양한 조건과 1650MHz ~ 2050MHz의 응용주파수 대역 내에서 낮은 LO 출력 전력을 이용하여 낮은 변환손실 및 높은 LO-IF와 RF-IF 격리도(isolation)를 갖는 초소형의 mixer를 설계 및 제작하고자 한다.

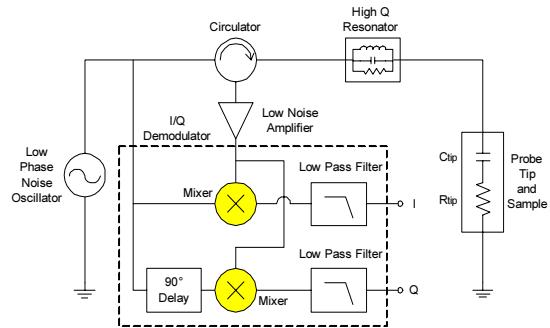


그림 1. Near field 마이크로웨이브 프루브 시스템의 블록 다이어그램

Fig. 1 Block diagram of near field microwave probing system

II. MMIC Mixer의 설계

I/Q demodulator에 사용할 single balanced MMIC mixer 가 TriQuint에서 제공하는 4-mil 두께의 기판을 기반으로 하는 GaAs p-HEMT 공정을 이용하여 설계되었다. 일반적으로 single balanced 형태의 mixer는 single ended mixer나 double balanced mixer에 비해 광대역 특성, 각 단자 간의 높은 격리도, 우수한 RF 입력정합 및 낮은 변환손실 특성 등의 장점이 있다^[5-6].

그림 2는 본 논문에서 설계한 single balanced MMIC mixer의 구조를 보여주고 있다. 본 MMIC mixer는 혼합 소자로서 2개의 쇼트키(schottky) 다이오드를 사용하였으며 180도 하이브리드(hybrid) 및 입출력 정합회로로 구성되어 있다. D1과 D2의 쇼트키 다이오드는 3단자 p-HEMT의 드레인(drain)과 소스(source) 단자를 연결하여 구현하였다. 여기서 3단자 p-HEMT를 선정할 때 TriQuint사의 GaAs p-HEMT 공정상 응용주파수 대역 내에서 최소한의 삽입손실(insertion loss)을 갖는 TQPED PHSS D-mode p-HEMT 소자를 선택하였다. 이 소자는 0.5um의 게이트 길이(gate length)와 250um의 게이트 폭

(gate width)을 갖는다^[7]. C1, C2, L1 및 L2는 LO 및 RF 신호를 위한 입력정합소자이며 저역통과필터(low pass filter)로 동작하는 C3과 L3은 IF 출력 신호를 위한 출력정합소자이다. 180° 하이브리드 커플러는 90° 하이브리드 커플러(quadrature hybrid coupler)와 $\lambda/4$ 전송선로를 결합하여 설계하였다.

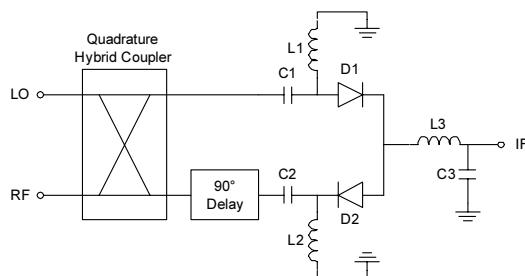


그림 2. Single balanced MMIC mixer의 구조
Fig. 2 Configuration of single balanced MMIC mixer

각각의 90° 하이브리드 커플러와 $\lambda/4$ 전송선로는 chip의 크기를 줄이기 위해 MIM 커페시터와 spiral 인덕터의 집중형 소자를 이용하여 설계하였다. TriQuint사에서 제공하는 4-mil 두께의 기판 위에서 50ohm의 특성 임피던스를 갖는 마이크로스트립 라인의 $\lambda/4$ 길이는 중심 주파수가 1750MHz인 경우 15200um 이상이다. 15200um의 마이크로스트립 라인을 회로에 직접 사용하는 것은 chip 크기 및 전력 손실 등에 심각한 영향을 줄 수 있다. 한편 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인은 집중형 소자를 이용하여 등가회로로 표현할 수 있으며, 본 논문에서는 90° 하이브리드 커플러를 설계하기 위하여 50ohm 및 35.35ohm의 특성임피던스를 갖는 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인을 π 형 및 T형 등가회로를 이용하여 설계하였다. 그림 3은 90° 하이브리드 커플러와 $\lambda/4$ 지연 선로를 이용한 180° 하이브리드의 등가회로를 보여주고 있다. 각각의 커페시턴스와 인덕턴스는 다음 식으로부터 얻을 수 있다^[8].

$$L_s = \frac{Z_0}{2\pi f_0} \quad [H] \quad (1)$$

$$L_p = \frac{Z_0}{2\sqrt{2}\pi f_0} \quad [H] \quad (2)$$

$$C_s = \frac{\sqrt{2}}{2\pi f_0 Z_0} \quad [F] \quad (3)$$

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_0 Z_0} \quad [F] \quad (4)$$

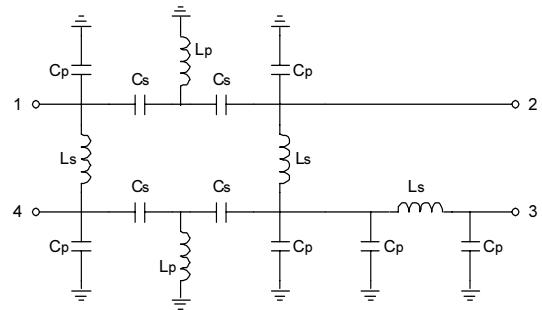


그림 3. 90° 하이브리드 커플러와 $\lambda/4$ 지연 선로를 갖는 180° 하이브리드의 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit of 180° hybrid with a quadrature hybrid coupler and a quarter wavelength delay line

그림 3과 같이 동위상의 RF 출력신호와 역위상의 LO 출력신호를 얻기 위한 180° 하이브리드 회로에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 설계주파수 대역에서 두 출력단자 2와 3의 출력 신호에 대하여 크기(amplitude) 및 위상(phase) 차이의 시뮬레이션 결과로서 0.05dB 및 182도를 각각 얻었다. 이와 같이 설계된 180° 하이브리드 회로와 쇼트키 다이오드 및 입출력 정합회로를 접적화하여 최종 single balanced MMIC mixer의 설계를 설계하였으며 10dBm의 LO 전력을 적용한 경우 낮은 변환손실 및 우수한 반사손실 특성이 나타나도록 각각의 정합회로 소자값을 미세 조정하였다.

그림 4는 설계된 MMIC mixer에 고정된 LO 출력을 입력하고 RF 전력이 변화할 때 IF 변환 출력, IF 단자에서의 LO 및 RF 격리도 등을 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 10dBm의 LO 전력이 입력되고 입력 RF 신호가 -40dBm에서 -10dBm까지 변화할 때 50dB 이상의 LO-IF 격리도 및 20dB 이상의 RF-IF 격리도가 각각 예측되었으며 RF 전력 변화에 대해 일정한 변환손실이 유지되는 것을 예측할 수 있다.

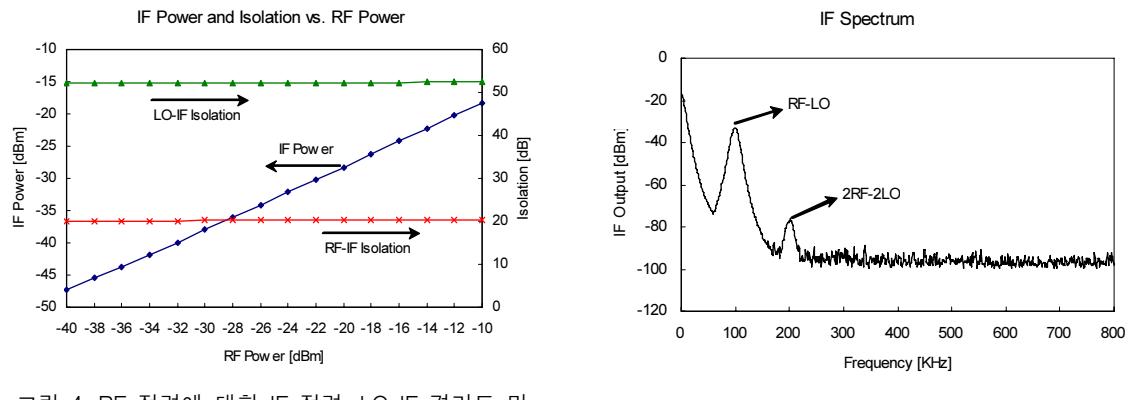


그림 4. RF 전력에 대한 IF 전력, LO-IF 격리도 및 RF-IF 격리도의 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation results of IF power, LO-IF isolation and RF-IF isolation versus RF power

III. 측정 및 고찰

앞서 서술한 바와 같이 설계된 single balanced MMIC mixer는 TriQuint사의 GaAs p-HEMT process를 이용하여 제작되었으며, Cascade Microtech Summit 9000TM on-wafer probe station 및 Agilent 8593E spectrum analyzer를 이용하여 측정되었다. 그림 5(a) 및 (b)는 100KHz의 IF 신호를 생성하기 위해 MMIC mixer에 1750.1MHz의 RF 신호와 1750MHz의 LO 신호를 입력하였을 때 IF 출력 스펙트럼(그림 5(a))과 IF 출력 단에서의 LO 및 RF 스펙트럼(그림 5(b))을 각각 보여주고 있다.

이 경우 10dBm의 LO 전력 및 -20dBm의 RF 전력이 각각 입력되었다. 10dBm의 LO 전력이 인가될 때 single balanced MMIC mixer는 약 11.9dB의 변환손실 특성을 나타내었다. 또한 IF 출력 단에서의 LO 전력 및 RF 전력은 -33.44dBm과 -44.53dBm으로 측정되어 LO-IF 및 RF-IF 격리도는 각각 43dB 및 24dB 이상의 특성을 나타내었다. 그림 6은 RF 전력이 -20dBm으로 고정되고 LO 전력이 5dBm에서 15dBm까지 변화할 때 MMIC mixer의 변환손실 특성을 측정한 것이다. LO 입력 전력이 8dBm 근처에서 포화하기 시작하였으며 1750MHz의 주파수 영역에서 10dBm의 LO 입력 전력에 대해 11.9dB의 변환손실 특성을 나타내었다.

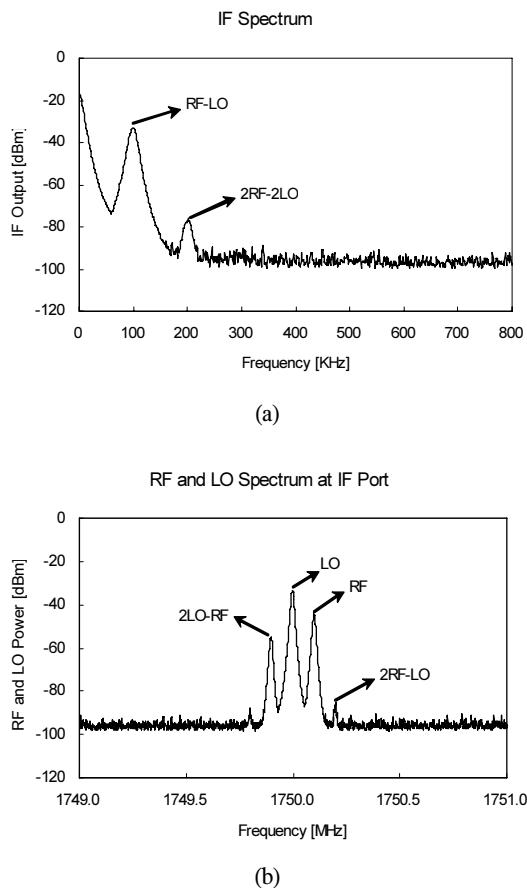


그림 5. 변환손실 및 격리도의 측정결과
(RF : -20dBm @ 1750.1MHz, LO : 10dBm @ 1750MHz);
(a) IF 스펙트럼 및 (b) LO-IF 및 RF-IF 격리도

Fig. 5 Measurement results of conversion loss and isolations (RF is applied at 1750.1MHz with -20dBm and LO is applied at 1750MHz with 10dBm); (a) IF spectrum and (b) LO-IF and RF-IF isolations

그림 7은 10dBm의 고정된 LO 전력이 mixer에 인가될 때 -40dBm에서 -10dBm까지의 RF 전력 변화에 따른 IF 출력 전력과 변환손실의 변화를 나타내고 있다. RF 입력 전력 범위에서 IF 출력 전력의 우수한 선형적 특성을 나타내고 있으며 약 12dB의 일정한 변환손실 특성을 나타내고 있다. 또한 그림 7에서 동일한 RF 및 LO 조건하에서 LO-IF와 RF-IF 격리도의 변화를 나타내고 있다.

본 논문에서의 MMIC mixer는 43dB의 LO-IF 격리

도 및 23dB의 RF-IF 격리도를 각각 나타내었다. 이 경우 역시 -40dBm에서 -10dBm까지의 RF 입력전력을 변화하면서 측정하였다. 제작된 MMIC mixer chip은 그림 8에서 나타낸 바와 같이 $2.5\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ 의 크기를 갖는다.

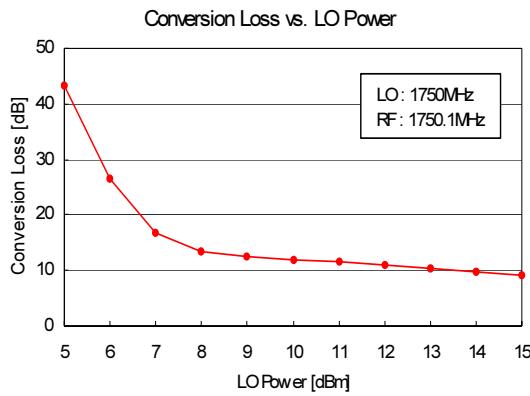


그림 6. LO 전력 변화에 대한 변환손실의 측정결과
Fig. 6 Measurement results of conversion loss for LO power variation

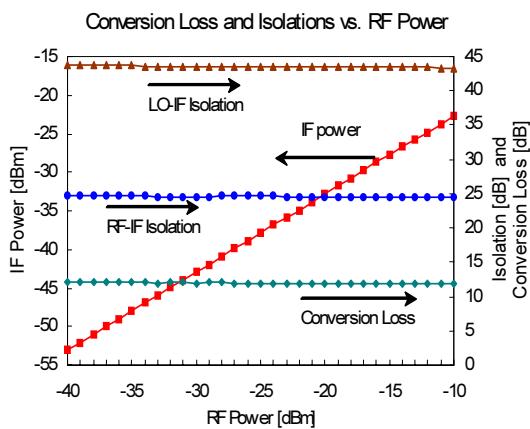


그림 7. RF 전력 변화에 대한 변환손실 및 격리도의 측정 결과
Fig. 7 Measurement results of conversion loss and isolations for RF power variation

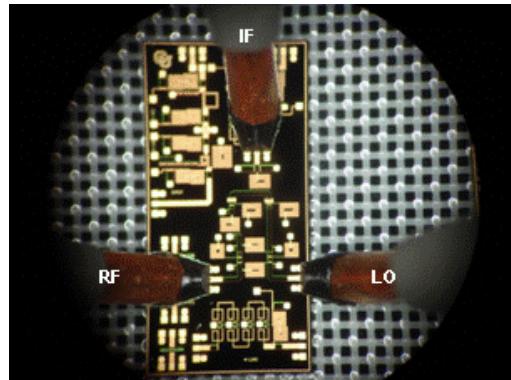


그림 8. $2.5\text{mm} \times 1.7\text{mm}(4.25\text{mm}^2)$ MMIC mixer 칩
Fig. 8 MMIC mixer chip with $2.5\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ (4.25mm^2)

IV. 결 론

본 논문에서는 비접촉 near field 마이크로웨이브 프루브 시스템의 I/Q demodulator를 위한 single balanced MMIC mixer를 TriQuint사에서 제공하는 GaAs p-HEMT 공정을 이용하여 설계 및 제작하였다. 본 mixer는 chip의 크기를 줄이기 위해 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인과 90° 하이브리드 커플러를 구현하기 위해 분포형 소자를 대신하여 MIM 커패시터 및 spiral 인덕터의 집중형 소자를 이용하였다. 제작된 초소형의 MMIC mixer는 1650MHz에서 2050MHz의 응용주파수 대역에서, 10dBm의 고정된 LO 입력전력에 대해 -40dBm에서 -10dBm까지의 RF 입력전력을 변화하면서 측정되었다. 측정결과 12dB 이하의 변환손실, 43dB 이상의 LO-IF 격리도 및 23dB 이상의 RF-IF 격리도 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서의 MMIC mixer 설계 기술은 상업용 및 우주용 등 다양한 응용시스템을 위한 주파수 변환기 설계에 유용하게 이용 가능하다.

참고문헌

- [1] Jonathan D. Chisum, Mabel Ramirez, and Zoya Popovic, "Planar Circuits for Non-contact Near Field Microwave Probing," *Proceedings of the 39th European Microwave Conference*, pp. 802-805, September 2009.
- [2] C.H. Lin, H.Z. Liu, C.K. Chu, H.K. Huang, C.C. Liu, C.H. Chang, C.L. Wu, C.S. Chang, and U.H. Wang, "A pHEMT Diode Single-balanced Mixer for K/K-band Application," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 11, pp. 2692-2694, November 2007.
- [3] V. Napijaro and V. Cozjocaro, "24GHz LTCC I/Q Mixer using Packaged HEMTs," *Proceedings of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conference*, pp. 454-458, October 2008.
- [4] M. Sudow, K. Andersson, P.A. Nilsson, and N. Rorsman, "A Highly Linear Double Balanced Schottky Diode S-band Mixer," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 336-338, June 2006.
- [5] Rowan Gilmore and Les Besser, *Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems*, Artech House, Norwood MA, 2003.
- [6] Stephen A. Mass, *Microwave Mixer*, Artech House, Norwood MA, 1992.
- [7] TriQuint Design Guide, 2008.
- [8] Y. Zhou and Y. Chen, "Lumped-element Equivalent Circuit Models for Distributed Microwave Directional Couplers," *ICMMT 2008 Proceedings*, 2008.

저자소개



류근관 (Keun-Kwan Ryu)

1992년 광운대학교
전자통신공학과 공학사
1994년 광운대학교
전자통신공학과 공학석사
2000년 광운대학교 전자통신공학과 공학박사
2000년 3월 ~ 2003년 1월 : 한국전자통신연구원
통신위성개발센터 선임연구원
2003년 ~ 현재 : 국립한밭대학교 전자공학과 교수
※관심분야: 초고주파용 능동/수동 회로 설계



김성찬 (Sung-Chan Kim)

1999년 동국대학교
전자공학과 공학사
2001년 동국대학교
전자공학과 공학석사
2006년 동국대학교 전자공학과 공학박사
2006년 ~ 2007년 동국대학교 밀리미터파 신기술연구
센터 박사후연구원
2007년 ~ 현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
※주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작