

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.6.175
JIIBC 2019-6-25

W-대역 MMIC 칩 국내 개발 및 송수신기 제작

Development and Manufacture of W-band MMIC Chip and manufacture of Transceiver

김완식*, 정주용*, 김영곤*, 김종필*, 서미희**, 김소수**

Wansik Kim*, Jooyong Jung*, Younggon Kim*, Jongpil Kim*,
Mihui Seo**, Sosu Kim**

요약 소형 레이더 센서에 적용할 목적으로 W-대역의 핵심부품인 MMIC 칩을 송신기 특성에 맞게 국내설계하고 0.1 μ m GaAs pHEMT 공정으로 제작하여 이를 해외 구매한 MMIC 칩과 성능 비교하였으며, 국내개발 MMIC 중에서 저잡음 증폭기의 잡음지수, 스위치의 삽입손실 그리고 하향변환 혼합기 MMIC 칩의 이미지제어 성능은 상용칩 보다 우수한 특성을 보임을 확인할 수 있었다. 국내개발 MMIC 칩을 W-대역의 도파관 저손실 전이구조 설계 및 임피던스 정합을 통해 송신부 및 수신부에 적용하여 제작 후 성능 검증하였으며, 제작한 송신부 출력은 26.9 dBm로 측정되어 분석 결과보다 우수한 결과를 보였고 수신부의 잡음지수는 9.17 dB로 분석 결과와 근사한 측정 결과를 보였다. 결과적으로 형 레이더 센서의 송수신기에 국내 개발 MMIC 칩을 적용하는 경우, 해외 구매 MMIC 칩 적용 시보다 성능이 향상될 것으로 기대된다.

Abstract For the purpose of Application to the small radar sensor, the MMIC Chip, which is the core component of the W-band, was designed in Korea according to the characteristics of the transceiver and manufactured by 0.1 μ m GaAs pHEMT process, and compared with the MMIC chip purchased overseas. The noise figure of low noise amplifier, insertion loss of the switch and image rejection performance of the down-converted mixer MMIC chip showed better characteristics than those of commercial chips. The MMIC chip developed in domestic was applied to the transmitter and receiver through W-band waveguide low loss transition structure design and impedance matching to verify the performance after the fabrication is 9.17 dB, which is close to the analysis result. As a result, it is judged that the transceiver can be applied to the small radar sensor better than the MMIC chip purchased overseas.

Key Words : GaAs pHEMT, MMIC, Seeker, W-band, W/G Transition loss

1. 서론

밀리미터파 레이더는 대부분 차량용 자동차에 장착하

여 송신파와 수신파를 비교하고 이로부터 획득된 수신 비트와 도플러 신호를 이용하여 전방차량과 거리 및 상대속도를 파악하여 차량의 충돌을 방지하거나 위험을 알

*정회원, LIG넥스원(주)

**비회원, 국방과학연구소

접수일자: 2019년 11월 06일, 수정완료: 2019년 11월06일

게재확정일자: 2019년 12월10일

Received: 06 Nov. 2019 / Revised: 07 Dec, 2019

Accepted: 10 Dec, 2019

*Corresponding Author: 김완식 wansik.kim@lignex1.com

Dept. of Radar R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

려주는 역할을 하며 최근에는 자율주행을 가능하게 하는 핵심 기술이다. 밀리미터파를 이용하는 레이더 센서는 대부분 W-대역을 사용하며 이 주파수 대역에서 지속적으로 연구가 활발하게 진행되고 있다. 국내의 경우 2001년 4월 전파법 제 9조의 규정에 의거 정보통신부 고시 제 2001-21호에서 W-대역을 차량레이더용으로 권고하였다.^[1]

차량용 레이더는 유럽을 선두로 W-대역의 밀리미터파를 활용하고 있으며, 이제는 밀리미터파 센서의 구현 방안 중 가격과 성능 면에서 많은 대안을 간구하고 준비되고 있다.^{[2][3][4][5][6][7][8]} 현재 일부 MMIC 칩 제작 업체에서 다채널 단일 칩을 공급하기는 하지만, 방산분야에는 공급이 제한적이므로 송수신기에 적합한 MMIC 칩의 확보가 어려운 한계가 있으므로 국내에서는 FMCW 레이더에 적용을 위하여 방산분야에서 확보하기 어려운 수신용 단일 MMIC 칩과 송신용 전력증폭 MMIC 칩을 개발한바 있으며,^{[9][10]} 이 칩들을 적용하여 W-band의 다채널 송수신기를 개발하고 전이구조 특성을 분석하여 시험된 전기적 특성을 비교 제시한바 있다.^{[11][12]} 본 논문에서는 소형 레이더 센서에 적용하기 위한 W-대역의 핵심부품인 MMIC를 국내 개발하였다. W-대역 MMIC 칩은 송신부, 수신부의 각 성능을 향상시키기 위한 목적으로 개발하였으며 이를 해외구매한 MMIC 칩과 성능 비교하였다. 또한 국내 개발된 MMIC 칩을 이용하여 송수신기 시제품을 제작하였으며, 이를 위하여 안테나 연결로부터 MMIC까지 W-대역의 전이구조 손실을 최소화되도록 설계하였고, 송신부 및수신부로 개별 제작하여 성능을 측정하였다.

II. W-대역 MMIC 칩의 국내개발

$F_c-0.5\text{GHz}$ F_c $F_c+0.5\text{GHz}$ W-대역의 소형 레이더 센서용 송수신기 시제품에 필요한 송신, 수신 및 주파수발생부용 MMIC 칩을 각 특성에 맞게 개발하였다. 송신, 수신부에 필요한 MMIC는 WinSemi. 사의 $0.1\mu\text{m}$ 의 GaAs pHEMT 소자 기술을 기반으로 국내 설계 후 제작되었다. 수신부에 활용하기 위한 W-대역 MMIC인 스위치와 저잡음증폭기를 통합한 단일 칩과 혼합기를 개발하였다. 이 경우 수신부에서 잡음지수를 결정하는 가장 핵심적인 요소는 스위치의 삽입손실과 저잡음증폭기의 잡음지수이며, 이를 위하여 저잡음증폭기와 스위치의 잡음지수와 삽입손실을 억제하기 위한 회로를 구현하였다.

개발된 저잡음증폭기의 잡음지수는 특성은 그림 1에서와 같이 중심주파수에서 3.3 dB이고, 스위치 삽입손실은 그림 2에서와 같이 중심주파수에서 1.73 dB가 측정되었다.

그림 3은 이미지 제거 혼합기의 설계 내용으로 측정결과 이미지 제거 혼합기는 이미지 주파수 성분을 억제함으로써 IF 신호의 노이즈를 제거할 수 있고, 이에 따라 송수신단 구성에서 여파기를 사용하지 않아도 되는 장점이 있다. 이미지 제거 혼합기는 두 개의 저항성 혼합기와 90도 하이브리드, 월킨슨 전력 분배기로 구성된다. LO 신호는 월킨슨 전력 분배기를 통해 두 개의 혼합기에 인가되고, RF 신호는 90도 하이브리드를 통해 인가되며 두 혼합기의 IF 출력 신호들은 90도 하이브리드를 통해 합성된다. 90도의 위상차를 가지며 하향변환된 RF 신호를 IF 주파수에서 다시 90도 위상차를 가지게 합성함으로써, 이미지 주파수의 성분은 제거되고 IF 신호는 합성되어 출력된다. IF 대역의 90도 하이브리드는 off-chip으로 제작되어 본딩와이어를 통해 MMIC와 연결된다.

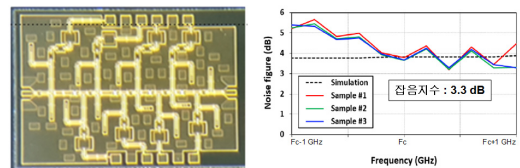


그림 1. 개발된 수신용 저잡음증폭 MMIC 칩 및 측정 결과
Fig. 1. Fabricated Low Noise Amplifier MMIC block diagram and test results at W-band

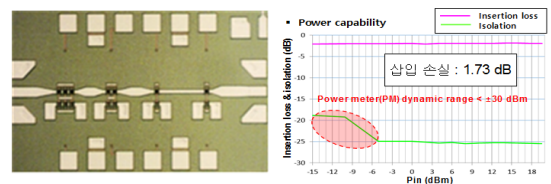


그림 2. 개발된 수신용 스위치 MMIC 칩 및 측정 결과
Fig. 2. Fabricated Switch MMIC block diagram and test results at W-band

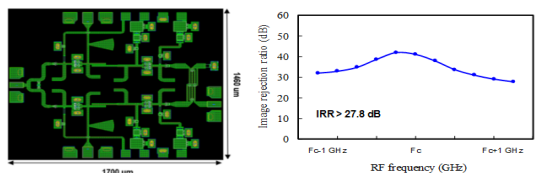


그림 3. 개발된 수신용 혼합기 MMIC 칩 및 측정 결과
Fig. 3. Fabricated Mixer MMIC block diagram and test results at W-band

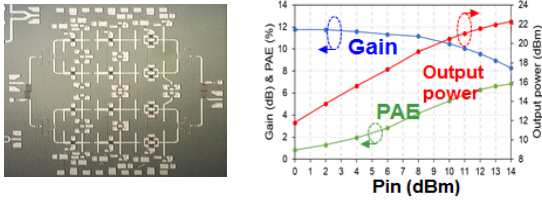


그림 4. 개발된 전력증폭 MMIC 칩 및 출력레벨 측정 결과
 Fig. 4. Fabricated Power Amplifier MMIC block diagram and test results at W-band

표 1. 국내 개발된 수신 및 송신용 MMIC 특성
 Table 1. Characteristics of MMIC developed for transceiver

구 분		단위	국내 개발 MMIC	해외 구매 MMIC	P/N	제조사
저잡음 증폭기	잡음지수	[dB]	3.3	5.0	gSSS0017	Gotmic
	스위치	삽입손실	[dB]	1.7	2.5	
혼합기	이미지제거	[dB]	27.8	24.0	gMGR0011	
전력증폭	출력	[dBm]	22.3	23.0	MAAP-0111 99	MA-COM
	이득	[dB]	9.7	12.0		
체배기	불요파억제	[dBc]	20.0	20.0	gXOB0017	Gotmic
스위치+저잡음 증폭기	잡음지수	[dB]	6.7	N/A	N/A	
	이득	[dB]	18.6	N/A		

송신부에 활용하기 위한 W-대역 전력증폭 MMIC는 높은 주파수 대역에서 단일 트랜지스터 얻을 수 있는 출력 전력이 작기 때문에 충분한 출력 전력을 얻기 위해서는 전력 결합을 통한 여러 개의 증폭기를 결합하는 방법이 주로 이용된다. 이러한 전력 결합 방식에는 크게 전압 결합과 전류결합 방식이 있다. 이중 전압 결합 방식은 여러 개의 트랜지스터의 출력 전압을 결합시켜 동일한 전류에서 높은 전력을 얻는 방식이다. 하지만 이러한 방식은 높은 주파수 대역에서는 각 트랜지스터 사이에서의 정합의 구현이 어렵고, 레이아웃에 의한 위상 변화에 민감하다는 문제가 있다. 이 때문에 높은 주파수 대역에서는 윌킨슨(Wilkinson) 분배기 및 랑게(Lange) 커플러를 이용한 전력 결합 방식을 활용하여 고출력의 전력증폭 MMIC를 설계 및 제작하였다. 결과적으로 그림 4와 같이 측정 결과를 보였다.

표1에서 해외 MMIC 및 국내개발 MMIC의 잡음지수, 출력 등의 특성을 비교하였다. 본 연구를 통해 국내개발된 저잡음증폭기, 스위치 및 혼합기는 해외 칩에 비해 잡음지수, 삽입손실, 이미지제거율 등의 특성에서 우수한

특성을 보였고, 전력증폭기 및 체배기는 유사한 수준임을 보였다.

III. W-대역 송수신기 제작

국내 개발된 MMIC를 활용하여 송신부 및 수신부를 포함하는 송수신기를 제작하였다. 송신부의 집적화 방식은 송신용 전력증폭 MMIC 기반의 하이브리드 집적화하여 아래 그림 5와 같이 국내개발 MMIC 기반으로 전이 구조 손실을 분석하고 유전체 기판 및 하우징 패키징을 적용하여 구현하였다. ADS 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 MMIC의 입력 및 출력에 공역 접합을 통한 최적의 매칭회로를 설계하였다. 모듈 설계 시에는 W-대역에서의 본딩 와이어가 높은 인덕터 성분으로 동작하기 때문에 병렬성분의 스티브와 얇은 선폭을 이용한 높은 임피던스의 전송선을 이용한 지역통과필터 타입의 매칭 회로로 구현하고 제작하였다. 송신부는 출력 전력 성능 향상을 위해 최적의 임피던스 정합을 통한 저손실 특성의 전송선로 및 전이구조를 구현하였다. 송신부는 최적의 임피던스 정합을 통한 저손실 특성의 전송선로 및 전이구조를 가져야 출력 전력의 성능을 향상시킬 수 있다. 송신부에서 구현된 전이 구조 및 본딩와이어 임피던스 정합 방식을 적용하여 스위치와 저잡음증폭기 통합 칩 및 혼합기 MMIC를 포함한 수신부를 그림 6과 같이 제작하였다.

MMIC를 모듈에 집적화하고 용이한 측정을 위해 도파관 형태로 구성되어야 하므로, E-probe 방식을 이용한 도파관(W/G)-마이크로 스트립라인(MSTL) 전이구조를 설계 및 제작하여 검증하였다. Back-short을 PCB 기판 위에 장착하고, 입출력 신호는 PCB 및 기구물 아래로 연결되도록 하였다. 그림 7은 W-대역 MMIC부터서 마이크로 스트립라인과 도파관까지의 전이구조에 관한 설계 및 제작 결과이다. 도파관 전이구조 관련기술은 여러 가지 방법이 있으나 대부분 Back short을 포함한다. CST 시뮬레이션 SW를 이용하여 전이구조의 형상을 설계하였다. 측정 결과 back-to-back 전이구조의 손실은 2.43 dB 이며, W대역에서의 마이크로 스트립 라인의 손실을 감안하면 (18 mm 선로 = 1.8 dB 손실) 전이구조의 한쪽의 손실은 0.3 dB 정도임을 알 수 있다.

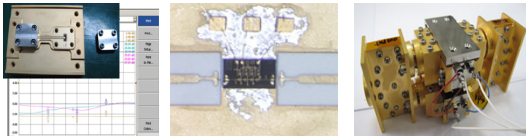


그림 5. W-대역 MMIC 칩을 적용한 송신부 패키징 형상
Fig. 5. Configuration of transmitter with W-band MMIC chips

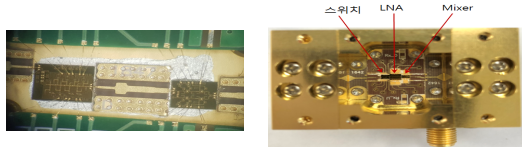


그림 6. W-대역 MMIC 칩을 적용한 수신부 패키징 형상
Fig. 6. Configuration of receiver with W-band MMIC chips

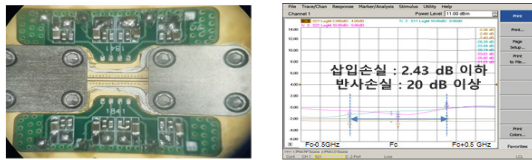


그림 7. 안테나연결 W/G에서 MMIC까지 전이구조 측정결과
Fig. 7. Test Results of W-band Waveguide transition for antenna

W대역의 송신부 및 수신부에서는 마이크로스트립 라인 선폭의 길이가 매우 짧으므로, high-low 임피던스 정합 방법을 ADS S/W를 이용하여 구현하였다(그림 8). 각각의 MMIC의 입출력 임피던스가 다르기 때문에 칩에 따라서 정합회로도 다르게 구현하였다. 그림 9는 W-대역에서 송신부의 전력증폭 MMIC의 결합을 위하여 도파관으로 2-Way 방식으로 제작하고 Back-to-Back으로 측정된 결과를 나타내고 있다. 길이 약 20 mm인 경우 도파관 결합기 연결 측정결과 Back-to-Back으로 0.6 dB이고 결과적으로 0.3 dB@W-band의 특성을 확인할 수 있었다.

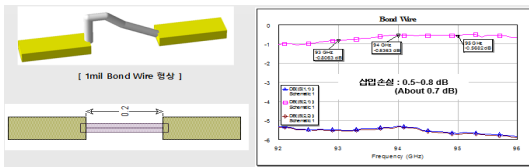


그림 8. W-대역 본딩 손실 측정을 위한 치구 및 측정 결과
Fig. 8. Test fixture and results of Wire bonding at W-band

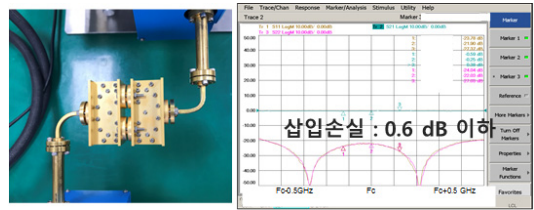


그림 9. W-대역 2-Way 결합 치구 및 측정 결과
Fig. 9. Test fixture and results of 2-Way combiner at W-band

표 2. 송신부의 전력증폭 MMIC 칩에서 W/G까지 전력준위 및 이득 분석

Table 2. Transition loss characteristics from Antenna waveguide transition to fabricated MMIC

송신부 구분	출력전력 분석	이득 분석	참고
전력증폭 MMIC	22.3 dBm	9.7 dB	국내개발
와이어 본딩 (150 μm) (3 mil)	-0.70 dB	-0.7 dB	그림 8
MSTL	-0.80 dB	-0.8 dB	0.1dB @1mm
도파관 전이구조	-0.60 dB (-0.3*2)	-0.6 dB (-0.3*2)	그림 7
2-Way 결합기	2.70 dB	2.7 dB	그림 9
2-Way 결합기	2.70 dB	2.7 dB	그림 9
예상 결과	25.6 dBm	12.9 dB	상온조건

표 3. 수신부의 안테나 W/G에서 MMIC 칩까지 잡음지수 및 이득 분석

Table 3. Transition loss characteristics from Antenna waveguide transition to fabricated MMIC

수신부 구분	잡음지수 분석	이득 분석	참고
도파관 전이구조	0.30 dB	-0.3 dB	그림 7
MSTL	0.80 dB	-0.8 dB	0.1dB @1mm
와이어 본딩 (200 μm) (1 mil)	0.70 dB	-0.7 dB	그림 8
스위치+LNA MMIC	6.70 dB	18.6 dB	국내개발
와이어 본딩 (200 μm) (1 mil)	0.70 dB	-0.7 dB	그림 7
믹서 MMIC	7.00 dB	-7.0 dB	국내개발
증폭기	0.90 dB	23.0 dB	IF 증폭기
예상 결과	8.59 dB	31.1 dB	상온조건

표 2는 그림 5와 6의 형상에서 그림 7에서 그림 9까지의 전이구조, 본딩 손실 및 결합 특성을 고려한 송신부 출력전력 결과이다. 22.3 dBm의 전력증폭 MMIC를 활용하고 설계 및 제작된 전이구조를 포함하여 25.6 dBm의 출력전력 레벨이 계산되었다.

표 3은 수신부의 형상조건으로 안테나에서 MMIC 칩까지의 잡음지수 및 이득을 계산한 결과로 수신부는 잡음지수는 8.59 dB 그리고 이득은 31 dB이다.

IV. 실험 및 결과

그림 10은 제작된 송신부와 수신부의 형상이다. 송신부는 국내개발 전력증폭 MMIC를 포함하는 단위 캐리어 2개를 이용하여 결합 후 2개의 2-way 송신부를 결합하여 최종 4-way 결합하였다. 수신부는 국내개발 스위치 및 저잡음증폭 MMIC와 혼합기 MMIC를 단위 캐리어로 하여 제작하였다. 실험 결과 그림 11과 같이 송신부의 출력전력은 26.9 dBm 그리고 수신부의 잡음지수는 9.1 dB, 이득은 30.3 dB로 측정되었다.

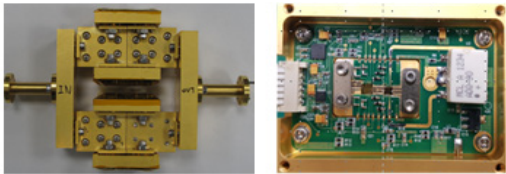


그림 10. 제작된 송신부 및 수신부 형상
 Fig. 10. Manufactured Configuration of Transceiver

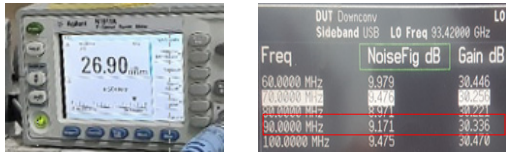


그림 11. 측정된 송신부 출력전력 및 수신부 잡음지수
 Fig. 11. Measured transmitter output power and Noise figure of receiver

표 4. 국내개발 송신용 칩을 이용한 출력전력 분석 및 측정결과
 Table 4. Output power analysis and measurement results using developed power amplifier MMIC Chip

구분		출력전력	이득	참고
송신부	분석값	25.6 dBm	12.9 dB	표2
	측정값	26.9 dBm	14.3 dB	그림11

표 5. 국내개발 수신용 칩을 이용한 잡음지수 분석 및 측정결과
 Table 5. Noise figure analysis and measurement results using developed low noise amplifier MMIC Chip

구분		잡음지수	이득	참고
수신부	분석값	8.59 dB	31.1 dB	표3
	측정값	9.17 dB	30.3 dB	그림11

표 4와 같이, 측정된 송신부 출력은 26.9 dBm 으로 상온 조건에서 분석된 25.6 dBm 보다 우수한 결과를 보였는데 이는 전력증폭 MMIC의 샘플 측정에 따른 개별 오차로 판단된다. 수신부의 잡음지수는 표 5와 같이 측정결과(9.17 dB)와 분석 결과(8.59 dB)가 약 0.6 dB의 차이로 유사한 값을 보였다. 국내개발 MMIC를 적용하여 송신부와 수신부에 W-대역의 도판관 전이구조를 적용하여 개발하였으며 다. 송신부 및 수신부 모두에서 분석 결과와 측정 결과가 유사한 결과를 보였으며 국내 개발 MMIC를 적용하여 소형 레이더 센서에 적용 가능한 성능을 보임을 확인하였다.

V. 결론

W-대역의 소형 레이더 센서에 적용 가능한 핵심부품의 국내개발을 위하여 송신부 및 수신부용 MMIC 칩을 0.1 μ m GaAs pHEMT 해외공정을 이용하여 각 특성에 맞게 개발하고 이를 해외 구매한 MMIC 칩과 성능 비교하였다. 스위치와 저잡음증폭기, 혼합기는 해외 구매 칩보다 우수한 성능을 보였고, 전력증폭기, 체배기 MMIC는 유사한 특성을 보였다. 본 논문에서는 국내 개발된 MMIC 칩을 시제에 적용하여 잡음지수, 이미지제거 및 출력 전력 값 등 전기적 성능을 검증하고, 해외 구매 MMIC보다 국내개발 MMIC를 적용 시 소형 레이더 센서 시스템에 우수하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] An Official Gazette No 16322, Radio Wave Research Institute No 2006-84, 2006. 8. 23.
- [2] J. Y. Hong, "Millimeter Radar Technology Trend for Forward Surveillance," ETRI Journal, Vol.22, No.5, Oct. 2007, pp.35-45.
- [3] Sangho Lee, "W-band dual channel receiver with active power divider and on-chip temperature-compensation circuit," (To be published)
- [4] Long, A.P., et al.: 'Wideband HEMT MMIC low-noise amplifier with temperature compensation', Electronic Letters, 1994, 30,(5), pp.422-423
- [5] Yamanaka, K., et al.: 'Ku-band Low Noise MMIC Amplifier with Bias Circuit for Compensation of Temperature Dependence and Process Variation', IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2002, 3, pp.1427-1430

- [6] Shin, S.-C., et al.: 'A temperature variation compensated 60-GHz low-noise amplifier in 90-nm CMOS technology', Asia-PacificMicrow. Conf. Proceedings, 2011, pp. 211-214
- [7] Sun-Il Kim "Design and fabrication of SSPA module in Ku Band satellite terminals", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 16, No. 4, pp. 59-64, 2016, DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.59>.
- [8] Hong-Gu Ji "Monolithic Integrated Amplifier for Millimeter Wave Band", The Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 11, No. 10, pp. 3917-3922, 2010, DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.10..3917>.
- [9] Seokchul Lee "W-band dual-channel receiver with active power divider and temperature-compensated circuit" Electronics Letters. Vol. 52, No. 10, May 12, 2016
- [10] Jungsik Kim "W-band Power Amplifier Using Broadband Impedance-Transforming Coupled Line Couplers" MOTL. Vol. 57, No. 4, April, 2015
- [11] Seokchul Lee "W-band Multichannel FMCW Radar Sensor with Switching-TX Antennas," IEEE Sensor Journal. Vol. 16, No. 14, July 15, 2016
- [12] Wansik Kim, "Development of W-band Transceiver Module using Manufactured MMIC", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 17, No. 2, pp. 233-237, Apr 2017, DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.233>.

저 자 소개

김 완 식(정회원)



- 1991년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2004년 2월: 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 1992년 11월: (주)대우전자 선임연구원
- 2001년 12월: 고등기술연구원 책임연구원
- 2005년 8월~현재: (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 회로설계, RF/밀리미터파 시스템, MMIC, 레이더 및 관련 센서 시스템

정 주 용(정회원)



- 2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
- 2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학석사)
- 2006년 1월 ~ 현재: (주)LIG넥스원 선임연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 집적회로, 영상레이더, 위성시스템

김 영 곤(정회원)



- 2006년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 2008년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2013년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2013년 1월~현재: (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야: 초고주파 회로설계, 초광대역 소자, 마이크로파 송수신기

김 종 필(정회원)



- 1997년 2월: 경기대학교 전자공학과 (공학사)
- 2011년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 1월~현재: (주)LIG넥스원 수석연구원
- 주 관심분야 : 레이더 및 반도체송수신모듈

서 미 희(비회원)



- 2006년 2월 : 고려대학교 물리학과(이학사)
- 2013년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
- 2013년 3월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 탐색기 송수신기

김 소 수(비회원)



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

- 1996년 1월~현재 : 국방과학연구소 책임연구원
- 주 관심분야 : 초고주파 탐색기 시스템

※ 본 연구는 국방과학연구소 계약번호 UC170028FD에 의하여 지원된 과제로 수행되었습니다.