

W-Band MMIC를 위한 T-형태 게이트 구조를 갖는 MHEMT 소자 특성

이종민¹ , 민병규¹, 장성재¹, 장우진¹, 윤형섭¹, 정현욱¹, 김성일¹, 강동민¹, 김완식²,
 정주용², 김종필², 서미희³, 김소수³

¹ 한국전자통신연구원 RF/전력부품연구실

² LIG 넥스원(주)

³ 국방과학연구소

Characteristics of MHEMT Devices Having T-Shaped Gate Structure for W-Band MMIC

Jong-Min Lee¹, Byoung-Gue Min¹, Sung-Jae Chang¹, Woo-Jin Chang¹, Hyung Sup Yoon¹, Hyun-Wook Jung¹,
 Seong-Il Kim¹, Dong Min Kang¹, Wansik Kim², Jooyong Jung², Jongpil Kim², Mihui Seo³, and Sosu Kim³

¹ RF/Power Components Research Group, Electronics and Telecommunications research Institute, Daejeon 34129, Korea

² LIG Nex1 Co., Ltd, Yongin 16911, Korea

³ Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

(Received November 11, 2019; Accepted December 18, 2019)

Abstract: In this study, we fabricated a metamorphic high-electron-mobility transistor (mHEMT) device with a T-type gate structure for the implementation of W-band monolithic microwave integrated circuits (MMICs) and investigated its characteristics. To fabricate the mHEMT device, a recess process for etching of its Schottky layer was applied before gate metal deposition, and an e-beam lithography using a triple photoresist film for the T-gate structure was employed. We measured DC and RF characteristics of the fabricated device to verify the characteristics that can be used in W-band MMIC design. The mHEMT device exhibited DC characteristics such as a drain current density of 747 mA/mm, maximum transconductance of 1.354 S/mm, and pinch-off voltage of -0.42 V. Concerning the frequency characteristics, the device showed a cutoff frequency of 215 GHz and maximum oscillation frequency of 260 GHz, which provide sufficient performance for W-band MMIC design and fabrication. In addition, active and passive modeling was performed and its accuracy was evaluated by comparing the measured results. The developed mHEMT and device models could be used for the fabrication of W-band MMICs.

Keywords: W-band, MHEMT, T-shaped gate, Recess, MMIC, Modelling, Passive device

1. 서론

최근 들어 레이다, 탐색기, 분광기, 차세대 기가급 이동통신기술 등의 활용이 기대되는 밀리미터 대역 및

서브 밀리미터 대역에서 동작하는 칩 및 시스템에 관한 관심이 고조되고 있다. 특히, 앞으로 정보량의 폭발적인 증가로 인한 초고속·광대역 통신 서비스에 대한 요구가 커짐에 따라 다양한 주파수 대역을 사용하는 활용 분야가 예측되며 특히 W-band (75~110 GHz) 대역은 신호 흡수 감쇠가 적어 FMCW (frequency modulation continuous wave) 레이더 시스템, 자동차 충돌방지 시스템, 통신 시스템 등의 응용을 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있다 [1,2].

✉ Jong-Min Lee; leejongmin@etri.re.kr

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.
 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.

W-band 시스템을 구현하기 위해서는 W-band 대역에서 동작하는 단일 집적 회로(millimeter monolithic integrated circuit, MMIC)의 확보가 필수적이며 우수한 특성의 MMIC 개발이 선행되어야 시스템의 소형화, 경량화, 고신뢰성 확보 및 대량생산을 통한 저가격화 등이 가능하다 [3,4]. 이러한 MMIC 소자의 핵심 능동 소자로 HEMT (high electron mobility transistor) 소자는 낮은 잡음 특성과 우수한 초고주파 특성뿐만 아니라 GaN 기반 소자의 경우 높은 항복 전압과 빠른 스위칭 특성으로 전력반도체로의 활용에도 주목받고 있다 [5-7].

높은 초고주파 특성을 얻기 위해서 InP 기반의 격자 정합된(lattice-matched) HEMT가 지속해서 연구됐으며, GaAs 기반의 HEMT와 비교하여 높은 이득 특성과 낮은 잡음 특성 및 우수한 초고주파 특성 등의 여러 장점으로 주목받고 있다. 그러나 GaAs 기반의 웨이퍼와 비교하면, InP 기반의 웨이퍼는 부서지기 쉽고, 가격이 비싸며 공정하기에 어려워 대량생산이 어렵다는 결정적 단점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위하여 GaAs 기판 위에 메타몰픽(metamorphic) 버퍼(buffer)층을 적용하여 InP 에피층을 사용하는 mHEMT가 제안되었다. 최근까지도 InP 기반 HEMT의 우수한 소자 특성과 GaAs 기반 mHEMT의 공정 용이성 등 각기 소자들의 장점만을 취하는 mHEMT를 활용한 MMIC에 관한 결과가 보고되고 있으며 사용연구가 활발하게 진행되고 있다 [3,4]. GaAs 기반의 mHEMT 소자는 4인치 이상의 GaAs 기판을 사용할 수 있으므로 소자의 제작 단가 절감과 더불어 W-대역 MMIC를 안정적으로 제작할 수 있다. 또한, W-band 대역 MMIC를 제작하기 위해서는 소자의 높은 초고주파 특성이 필요하므로 본 연구에서는 소자의 문턱 전압 조절과 특성을 향상하기 위한 게이트 리세스 공정을 적용한 밀리미터파 응용에 사용 가능한 GaAs 기판 위에 InGaAs/InAlAs 에피층을 갖는 mHEMT를 구현하고 그 특성을 분석하였다. 또한, MMIC 설계에 필수적인 능동·수동 소자의 특성을 분석하여 모델링을 수행하였다.

2. 실험 방법

W-band MMIC 제작을 위한 GaAs 기반의 mHEMT에서 사용한 웨이퍼의 에피택셜 구조는 반절연성(semi-insulating) GaAs 기판 위에 분자선 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE) 방식으로 성장되었다. 기판 위

에 고농도 InGaAs 채널층과 정합 상태를 만들어 주며 발생하는 전위결함이 소자 채널층까지 전파되는 것을 방지하기 위하여, graded-InAlAs 완충층, InAlAs 완충층을 형성하였으며 채널층에서의 indium 비율은 0.6이 되도록 하였다. 버퍼층과의 격자 정합을 고려하면 indium의 조성 비율은 0.53 값이 적합하지만 InAs 이 증가할수록 채널층의 이동도가 빨라지므로 조성을 증가시켰다. In 채널층 위로 InAlAs spacer층, planar 도핑층, InAlAs Schottky층, InGaAs cap층의 구조로 되어 있다. 본 연구에서 제작한 mHEMT 소자의 제작은 먼저 소자 사이를 전기적으로 분리하기 위해 메사 공정을 인산계열의 식각용액($\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}=1:1:40$)을 사용하여 수행하였으며 이후 소스와 드레인 오믹전극을 동시에 증착하였다. 사용한 오믹전극은 Au/Ge/Ni/Ti/Au를 340/170/115/115/1,200 Å 두께로 증착하였다. 사용한 오믹전극은 열처리 후의 전극의 표면 거칠기 및 접촉 저항값을 고려하여 최적화하였다. 소자의 고속 특성을 향상하기 위해서는 게이트 길이를 짧게 만들어야 하며 게이트 전극 형성을 위한 게이트 패턴의 형성은 일반적으로 많이 사용되는 전자빔 노광 방법을 사용하여 100 nm 길이를 갖는 패턴을 형성하였다. 소자의 문턱 전압을 조절하며 상호전달 전도도를 향상하기 위하여 리세스 공정을 수행하였다. 리세스 공정은 먼저 에칭되는 게이트 영역을 패터닝 한 후에 석신산(succinic acid) 및 시트르산(citric acid) 계열의 에칭액을 사용하여 InGaAs 캡층과 InAlAs schottky층을 식각하는 방법을 사용하였다. 리세스 공정에서는 리세스 되는 깊이뿐만 아니라 리세스 식각 중에 게이트 길이가 증가하는 것을 최대한 억제하여야 한다. 본 연구에서는 재현성 있는 리세스 공정이 이루어지도록 에칭액의 농도와 시간을 여러 번의 실험을 거쳐 최적화하였다. 제작이 완료된 소자의 단면을 살펴본 결과 게이트 패턴이 확장되며 실제 게이트 전극이 증착되는 길이는 대략 130 nm로 확인되었다. 재현성 있는 T-형태 게이트 구조를 갖게 하도록 감광도가 서로 다른 3층 감광막 구조를 사용하였다. 이후 전자선 진공 증착 장비를 사용하여 Ti/Au를 500/4,000 Å 두께로 증착하고 리프트오프하였다. 소자 보호를 위해 50 nm 두께를 갖는 SiN 절연막을 증착하였으며 그림 1에 제작된 T-형태 게이트 구조를 갖는 소자의 단면 사진을 나타내었다. 상기 방법으로 다양한 소자구조 파라미터를 갖는 소자를 제작하였으며 대표적으로 게이트 폭은 $2 \times 50 \mu\text{m}$ 이며 소스와 드레인 전극의 간격은 2 μm , 소스와 게이트 전극의 간격은 0.5 μm 인 mHEMT 특성을 나타내었다.

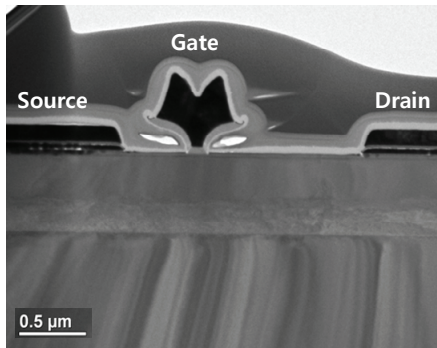


Fig. 1. Cross-sectional view of 2-finger (2×50 um) T-shaped gate mHEMT.

MMIC 제작을 위한 저항은 NiCr 금속을 진공 증착기를 사용하여 제작되었다. 배선을 위한 금속을 NiCr 저항 양쪽에 연결하여 MMIC 내에서 다른 소자와 연결을 할 수 있도록 하였으며 저항금속의 폭은 10 um으로 하고 길이는 10~40 um로 다양하게 설계하였으며 증착된 두께는 60 nm이다. 캐패시터는 SiN 절연막을 하부전극과 상부 전극 사이에 배치하는 금속-절연막-금속 구조를 사용하였다. 사용된 절연막은 mHEMT 소자를 보호하기 위해 증착한 50 nm 두께를 갖는 SiN 절연막이며 입출력 배선금속은 각각 다른 금속을 사용하였다. 전면 공정이 완료된 후에는 웨이퍼의 두께를 100 um이 되도록 래핑(lapping) 하였으며 소자 접지를 위한 후면 비아(backside via)를 형성하여 공정을 완료하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MHEMT 소자 측정 및 특성

제작한 mHEMT 소자의 특성을 평가하기 위해 DC와 RF 특성을 측정하였다. 소자의 DC와 RF 특성은 웨이퍼 상태에서 Cascade사의 on-wafer probe station을 이용하여 측정하였다. DC 특성은 Keysight사의 HP4142 전원공급기를 이용하여 전압을 변화시키며 인가하여 측정하였으며 그림 2는 총 게이트 폭이 100 um이며 두 개의 게이트를 갖는 소자의 전류-전압 측정 결과이다. 측정된 mHEMT 소자에 대해서 드레인 전압(V_{DS})을 0 V에서 1.2 V까지 변화시키면서 게이트 전압(V_G)을 -1 V에서 0.4 V까지 0.175 V의 단계로 주었을 때의 드레인 전류 값(I_D)을 측정하였다. 측정한 mHEMT 소자는 좋은 핀치오프 특성을 보여주고 있고, 게이트 전압이 -1 V일 때 34 uA의 누설전류를 보이며 게이트 전압이 0.4 V일

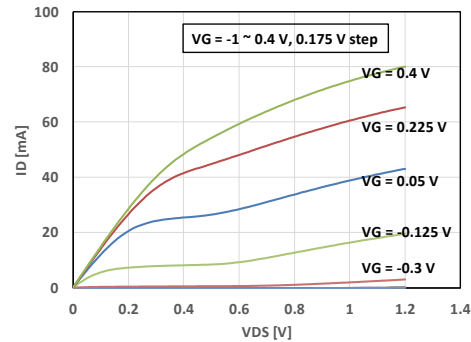


Fig. 2. I-V characteristics of 2-finger (2×50 um) T-shaped gate mHEMT.

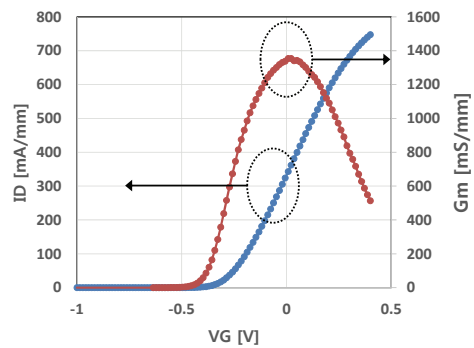


Fig. 3. Transconductance characteristics of 2-finger (2×50 um) T-shaped gate mHEMT.

때 최대 드레인 포화전류(I_{DSS})는 80 mA이다. 제작된 mHEMT의 상호전달 전도도(g_m , transconductance) 특성을 같은 장비를 사용하여 측정하였다. 드레인 전압은 1 V로 고정하고 게이트 전압을 -1 V에서 0.4 V까지 변화시키면서 소자의 측정 결과, 핀치오프 (pinch-off) 전압은 -0.42 V, 드레인 전류밀도는 $V_{DS} = 1.0$ V 및 $V_G = 0.4$ V에서 747 mA/mm이며, 최대 상호전달 전도도는 $V_{DS} = 1.0$ V 및 $V_G = 0.008$ V에서 1.354 S/mm의 우수한 특성을 얻었다. 게이트 전압 변화에 따른 드레인 전류 밀도 특성 및 상호전달 전도도 특성을 그림 3에 나타내었다.

제작된 mHEMT의 S-parameter는 Keysight사의 N5245A 마이크로파 네트워크 분석기를 이용하여 측정하였다. 측정주파수 범위는 0.5~50 GHz이며 측정 바이어스 조건은 $V_{DS} = 1.0$ V, $V_G = 0.1$ V이다. 그림 4는 2×50 um 게이트를 갖는 mHEMT의 RF 특성으로, 측정된 S-parameter 값으로부터 정한 전류 이득(h_{21})과 MSG/MAG 곡선을 나타낸 것으로, h_{21} 을 -20 dB/decade로 외삽하여 구한 215 GHz의 전류이득 차단주파수(f_T)와 264 GHz의 최대공진 주파수(f_{max})를 얻었다.

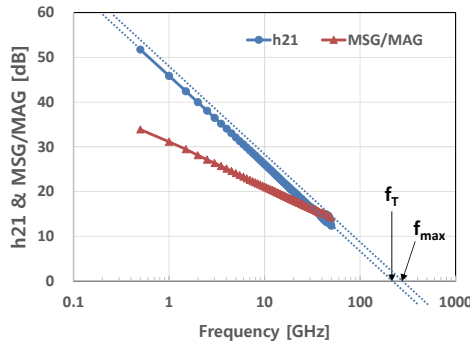


Fig. 4. RF characteristics of 2-finger (2×50 μm) T-shaped gate mHEMT.

3.2 소자 모델링

W-band MMIC를 제작하기 위해서는 MMIC 설계 프로그램에서 사용할 수 있는 mHEMT 모델이 필요하다. 소자의 동작 바이어스에서 소자의 특성을 정확하게 묘사할 수 있는 소신호·대신호 모델이 필요하며 그동안 다양한 등가회로를 갖는 물리적인 모델 등이 제시됐다 [8,9]. 본 연구에서는 소자 모델링을 위해 Keysight사의 ICCAP 프로그램의 ROOT FET 모델을 사용하였다. 사용한 모델은 측정된 값을 기반으로 하는 모델로 세밀하게 바이어스 레벨과 주파수를 나누어서 측정을 오랜 시간 진행하여 많은 측정값을 가지고 모델링을 수행한다. 측정값을 사용하므로 별도의 등가회로 설계와 최적화 과정이 필요하지 않아 훨씬 빠르고 간단하게 모델링이 완료되는 장점이 있다 [10]. 모델링을 수행한 mHEMT 소자 역시 앞서 특성을 측정한 2×50 μm 게이트를 갖는 소자이다. 모델링은 웨이퍼 상태에서 ICCAP 프로그램을 이용하여 진행하였으며 그림 5의 소자 레이아웃에서 볼 수 있는 바와 같이 150 μm 간격을 가지는 입출력 패드를 프루빙하여 바이어스 및 S-parameter

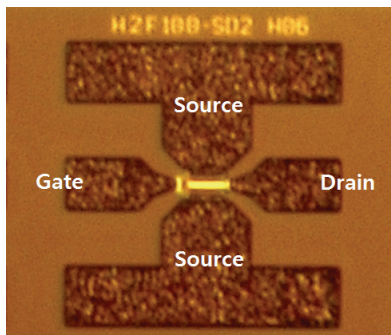


Fig. 5. Micrography of the fabricated 2-finger (2×50 μm) T-shaped gate mHEMT.

측정을 하였다. 그림 6은 DC 파라미터를 측정한 측정 결과와 모델링한 결과를 비교한 것이다. 그림 6(a)에서는 전류-전압 특성을 비교하였고 그림 6(b)에서는 상호전달 전도도 특성을 비교하였다. 검은색 실선으로 나타낸 것은 측정 결과이며 붉은 실선으로 나타낸 것은 모델값을 나타낸 것으로 비교된 결과로부터 소자의 핀치 오프 전압 특성과 이득 특성 등이 거의 일치함을 확인하였으며 모델링이 정확함을 확인할 수 있었다. 그림 7에서는 소자의 RF 특성을 비교하였다. 소자의 동작 바이어스가 $V_{DS} = 0.8 \text{ V}$, $V_G = -0.1 \text{ V}$ 일 때의 결과를 비교하였으며 가는 붉은 실선이 측정된 결과이며 굵은 파란 실선이 모델링 결과를 나타내었다. 그림 7(a)에서는 소자의 입출력 반사특성을 비교하였으며 그림 7(b)에서는 소자의 전달 특성을 비교하였다. 0.1~50 GHz 주파수 범위 가운데 저주파에서는 어느 정도 차이가 나타나지만, 이득 특성은 모든 주파수 범위에서 모델이 매우 정확함을 확인할 수 있다.

W-band MMIC을 제작하기 위해서는 mHEMT 소자 모델뿐만 아니라 수동 소자인 저항과 캐패시터의 특성을 정확히 알아야 한다. 수동 소자 모델은 MMIC을 설계할 때 사용하는 Keysight사의 ADS 프로그램에서 제공하는 microstrip 기반 모델을 사용하였다. 저항은

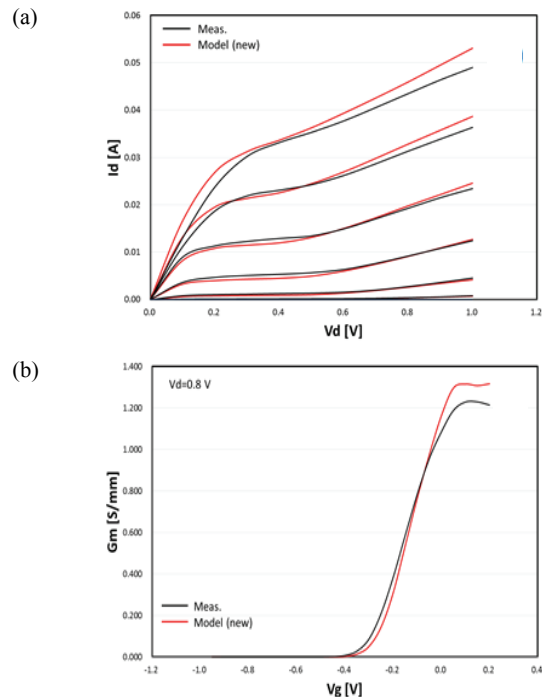


Fig. 6. Comparison of the measured (black line) and calculated (red line) DC characteristics for mHEMT: (a) I-V and (b) transconductance.

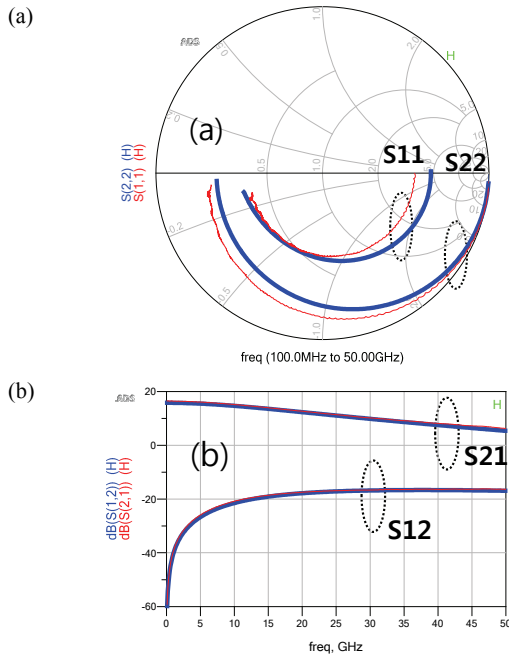


Fig. 7. Comparison of the measured (red line) and calculated (blue line) RF characteristics for mHEMT: (a) reflection and (b) transmission.

TFR (thin film resistor) 모델을 사용하였고 캐패시터는 MTFC (microstrip thin film capacitor) 모델을 사용하였으며 수동소자 파라미터값의 최적화 과정을 통해 측정된 S-parameter 값과 모델값이 일치되도록 하였다. 수동 소자 모델을 위한 기판정보는 물질 상수로부터 구해지므로 수동 소자의 폭과 길이 및 넓이에 따라 수동소자값이 변화하게 된다. 저항의 폭은 10 μm 로 하고 다양한 길이를 갖는 저항을 측정 후 최적화 과정을 통해 추출한 저항의 시트저항 (sheet resistance)는 22 ohm/sq. 으로 구해졌다. 캐패시터는 저항과 같은 방법으로 다양한 면적을 갖는 소자를 측정하여 최적화 과정을 통해 단위 면적당 캐패시턴스 값 900 pF/mm^2 를 결정하였다.

4. 결론

본 연구에서는 2단계 게이트 리세스 식각 공정과 3층 감광막을 사용하여 개발한 T-형태 게이트 구조를 갖는 GaAs 웨이퍼를 이용한 mHEMT 소자를 제작하였으며 소자의 DC와 RF 특성을 조사 분석하였다. 게이트 길이는 W-band 대역 MMIC에 적용할 수 있는

소자 특성을 확보하기 위해서 전자빔 노광 방법을 사용하여 100 nm인 패턴을 형성하였으며 리세스 공정 후에 확인된 실제 게이트 전극과 쇼트 키 층과의 접촉 길이는 0.13 μm 이었다. 제작된 총 게이트 폭이 100 μm 이며 단위 게이트 폭이 50 μm 인 2개의 게이트를 가지고 있는 mHEMT 소자는 747 mA/mm 의 드레인 전류 밀도, 1.354 S/mm 의 최대 상호전달 전도도, -0.42 V의 핀치오프 전압 등의 DC 특성을 보였다. 소자의 주파수 특성은 215 GHz의 차단 주파수, 260 GHz의 최대 공진 주파수 특성을 보였으며 W-band MMIC 설계 및 제작을 위한 충분한 성능을 보였다. W-band MMIC 설계를 위해서는 충분한 소자 성능뿐만 아니라 MMIC를 구성하는 능동·수동 소자 모델이 필수적이므로 설계에 사용하는 프로그램에서 지원하는 모델을 사용하여 모델링을 수행하였다. mHEMT 소자는 측정값 기반의 ROOT FET 모델을 이용하며 수동 소자인 저항과 캐패시터는 Microstrip 기반의 모델을 사용하였다. 측정된 소자 특성 결과와 추출된 모델의 결과값을 소자의 동작 바이어스 및 넓은 주파수 대역에서 비교한 결과 모델링 결과의 정확도를 확인하였다. 본 연구에서 제작한 mHEMT 소자와 능동·수동 소자 모델은 앞으로 W-대역의 MMIC 개발에 충분히 활용될 것으로 기대된다.

ORCID

Jong-Min Lee

<https://orcid.org/0000-0002-0946-0615>

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 계약번호 UC170028FD에 의하여 지원된 과제로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] J. Park, H. Ryu, K. W. Ha, J. G. Kim, and D. Baek, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **63**, 1399 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2406071>]
- [2] W. Chang, S. I. Kim, J. M. Lee, S. H. Lee, and J. W. Lim, *Proc. 2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)* (IEEE, JeJu, Korea, 2019) p. 907. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ITC-CSCC.2019.8793428>]

- [3] R. Weber, H. Massler, and A. Leuther, *Proc. 2017 IEEE MIT-S International Microwave Symposium (IMS)* (IEEE, Honolulu, USA, 2017) p. 756. [DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058686>]
- [4] D. M. Kang and H. S. Yoon, *Microwaves Opt. Technol. Lett.*, **54**, 1978 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.26948>]
- [5] K. M. Jung, Y. S. Lee, S. J. Kim, D. H. Kim, J. M. Kim, H. G. Choi, C. K. Hahn, and T. G. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **21**, 885 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2008.21.10.885>]
- [6] K. H. Kim, S. U. Hong, M. C. Paek, K. I. Cho, S. S. Choi, J. W. Yang, and K. H. Shim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **19**, 605 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2006.19.7.605>]
- [7] J. J. Kim, H. K. Ahn, S. B. Bae, Y. R. Pak, J. W. Lim, J. K. Moon, S. C. Ko, K. H. Shim, and J. W. Yang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 862 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.11.862>]
- [8] T.T.L. Nguyen and S. D. Kim, *Microwaves Opt. Technol. Lett.*, **59**, 131 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.30247>]
- [9] S. W. Moon, B. C. Jun, S. H. Jung, D. S. Park, J. K. Rhee, and S. D. Kim, *Curr. Appl. Phys.*, **12**, 81 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2011.04.046>]
- [10] J. Wood and D. E. Root, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **48**, 2352 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1109/22.898984>]