

GaN HEMT를 이용한 기지국용 전력증폭기 연구 동향

서민철·양영구

성균관대학교

I. 개 요

이동통신 기지국용 전력증폭기 분야는 급격히 팽창 및 발전해 왔지만, 고주파 특성, 고출력 특성, 고선형 특성 및 고효율 특성에 대한 요구는 오히려 점점 커지고 있다. 현재 상용 기지국용 송신기에 사용되는 전력증폭기는 대부분 silicon을 이용한 LDMOSFET(Laterally-Diffused Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)이 적용되고 있다.

그러나 위에서 언급한 요구사항들로 인하여 더욱 성능이 뛰어난 소자에 대한 시장 진입 기회는 여전히 존재하고 있다. 그 중에서도 GaN HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)는 높은 전력밀도와 항복전압을 가지며, 높은 주파수 특성과 고효율 특성을 가져 고출력 기지국용 전력증폭기에 매우 적합한 특성을 가지고 있다. 이에 LDMOSFET을 대체할 수 있는 소자로서의 가능성에 대해 상당 기간 주목 받아 왔다. 수 년 전만 해도 우수한 성능에 비해 가격이 비싸 L 및 S 대역에 주로 분포되어 있는 상용 기지국 응용에 대하여는 LDMOSFET과 경쟁이 불가능해 보였다. 현재는 LDMOSFET에 비하여 약 1.5배 정도로 가격이 낮아져 점점 LDMOSFET을 대체해 갈 수 있을 것으로 예상되고 있다.

2002년 GaN HEMT 기술의 중요성을 인지하고, 부족한 기술의 발전을 위하여 Wide-Bandgap Semiconductors-RF(WBGs-RF) 프로그램이 처음 시작되었다<sup>[1]</sup>. 그 결과, 다양한 연구 결과뿐만 아니라, 여러 회사에서 상용화에 적용이 가능한 다양한 주파수 대역의 소자를 출시하였으며, 현재까지도 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2]</sup>.

본 고에서는 현재 GaN HEMT를 이용한 전력 증폭기에 대한 연구 동향을 살펴보고, 현재 상용 기지국 전력 증폭기에 많이 사용되는 도허티 전력 증폭기의 대역 확장에 관한 최신 연구 내용들을 소개 및 정리하겠다.

먼저 고출력을 위한 내부 정합을 통한 패키지 구조에 관

한 연구에 대한 소개<sup>[3]~[7]</sup>를 한 후 소형화를 위한 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits) 전력 증폭기에 관한 연구에 대한 소개<sup>[8]~[13]</sup>를 하도록 하겠다. 마지막으로 GaN HEMT를 이용한 고효율 도허티 전력 증폭기에 대한 연구들, 특히 최근 화두가 되고 있는 광대역 도허티 증폭기 설계 기술에 대한 주요 연구들<sup>[13]~[19]</sup>을 살펴보도록 하겠다.

II. 패키지 내부 정합 연구

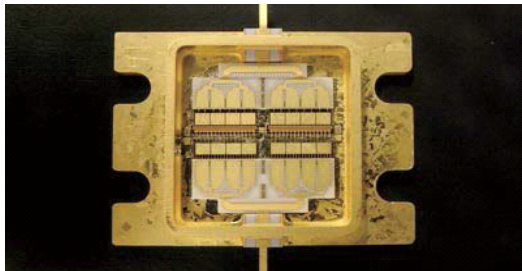
고출력 트랜지스터는 매우 낮은 입/출력 정합 임피던스를 갖는다. 이를 50옴의 포트 임피던스로 정합하기 위해서는 정합 Q-factor가 매우 높은 회로가 사용될 수밖에 없다. 이러한 회로에 Q-factor가 낮은 수동소자를 사용하거나, 상대유전율이 낮은 PCB를 사용한다면 큰 손실을 갖게 되어 성능이 나빠질 가능성이 높다.

이 때문에 Q-factor가 매우 높은 평판 커패시터와 본드와이어를 통해 얻어지는 인덕터를 적절히 패키지 내부에 배열하여 부분적이거나 전체적인 정합을 얻어내거나, 상대유전율이 매우 높은 보드상에 박막공정을 이용하여 정합회로를 구현하는 패키지 내부 정합 회로에 대한 연구와 구현이 활발히 진행되고 있다<sup>[3]~[7]</sup>. <표 1>은 대표적인 GaN HEMT 패키지 내부 정합에 관한 구현 결과들에 대한 요약을 나타낸다. 참고문헌 [3], [4]는 입/출력에 상대유전율이 매우 높은 PCB를 배치하고 그 위에 정합회로를 구현하는 구조를 채용하여 패키지 내부에 부분 정합회로를 구현하였다. 참고문헌 [5], [6]에서는 패키지 내부에서 전체 정합회로를 구현하였다. [그림 1]은 참고문헌 [6]의 패키지 내부에서 전체 정합을 구현한 GaN HEMT의 패키지 사진을 나타낸다. 참고문헌 [7]은 평판 커패시터와 본드와이어의 인덕터를 이용하여 패키지 내부에 부분 정합회로를 구현하였다. 향후 silicon이나 유리 또는 알루미늄 기판위에 수동소자를 구현하는 integrated passive device(IPD)를 이용하여 완전히 정합을 이룬 IM-

<표 1> GaN HEMT 패키지 내부 정합에 관한 연구들

	Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [7]
Manufacturer	Eudyna	Eudyna	Cree	Sumitomo	Nitronex
Frequency (GHz)	3.2	2.9	3.45	9	2.14
Gain (dB)	14.1	14.5	12.5	10.2	16
$P_{out}$ (W)	1,000	912	550	333	156
Efficiency @ peak (%)	49.5*	56.4*	66*	37**	65*
Drain biases (V)	80	70	55	65	28
Technique	Partial internal match	Partial internal match	Full internal match	Full internal match	Partial internal match

\* Drain efficiency, \*\* Power added efficiency (PAE).



[그림 1] 내부 정합된 GaN HEMT 패키지 사진<sup>[6]</sup>

FET(Internally Matched FET)에 대한 연구가 본격화 될 것으로 기대된다.

### III. GaN HEMT 전력 증폭기 MMIC

보다 더 큰 집적을 위한 GaN HEMT MMIC 전력 증폭기에 대한 다양한 연구 결과가 발표되어왔다(<표 2> 참고). 이동 통신 시스템에서 소형 셀 단위의 영역을 커버하기 위한 소형 송신기용 전력증폭기와 위성 및 레이더 시스템 적용을 위한 밀리미터 대역의 전력 증폭기에 적용하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다<sup>[8]~[13]</sup>.

특히, 밀리미터대역에서 동작하는 전력증폭기는 트랜지션과 정합에서 큰 손실을 가질 수 있기 때문에 MMIC 구현이 선호되고 있다. 참고문헌 [8], [9]에서는 전체가 정합되어

<표 2> GaN HEMT MMIC 소자에 관한 연구들

	Ref. [8]	Ref. [9]	Ref. [10]	Ref. [11]	Ref. [12]	Ref. [13]
Process	TriQuint's 0.25- $\mu$ m	TriQuint's 0.25- $\mu$ m	BAE Systems's 0.2- $\mu$ m	Raytheon's 0.15- $\mu$ m	QuinStar's 0.14- $\mu$ m	TriQuint's 0.25- $\mu$ m
Frequency (GHz)	1~2.7	2~19	2~20	71~76	75~100	1.8
Gain (dB)	12~17	6.5~10	8~11	9.5	5	18.9
$P_{out}$ (W)	4~5	11~18	10~22	3	1	3.6
Efficiency @ peak (%)	40~50**	24~38**	15~36**	14**	10**	56.3**
Drain biases (V)	32	35	30	25	12	28
Technique	Fully integrated NDPA***	Fully integrated NDPA***	DFPA****	3-stage PA	Traveling-wave combiner circuit	DPA #

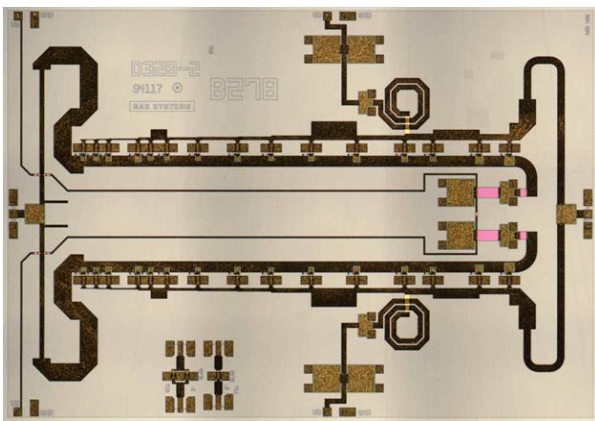
\* Drain efficiency, \*\* Power added efficiency (PAE), \*\*\* Non-uniform distributed power amplifier,

\*\*\*\* Dual field plate power amplifier, #Doherty power amplifier.

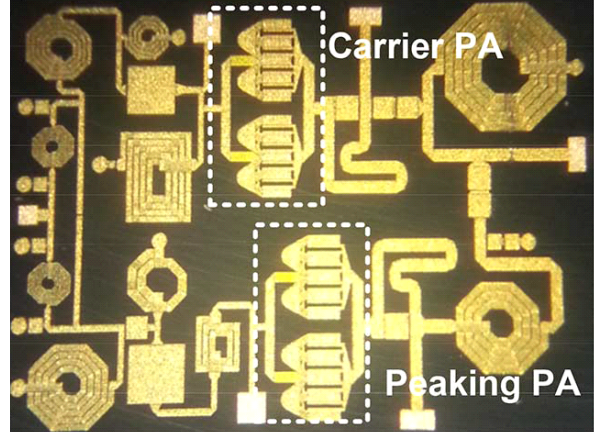
진 비균일 분배구조의 MMIC 전력 증폭기를 제안하였다. 참고문헌 [10]에서는 AlGaN에 Ni와 Ti-Pt-Au를 접합한 dual field plate 형태의 소자를 통하여 2~20 GHz의 광대역 특성을 구현하였다. 참고문헌 [11]에서는 75~76 GHz 주파수 대역에서 3단 구조를 갖는 MMIC 전력 증폭기를 설계 및 구현하였다. 참고문헌 [12]에서는 traveling wave 전력 결합기를 이용하여 W-대역(75~110 GHz)의 전력 증폭기를 설계 및 구현하였다. [그림 2]는 참고문헌 [10]의 GaN HEMT MMIC 전력 증폭기 사진이다. 다수의 셀과 전력 분배 및 결합회로 그리고 임피던스 정합 회로로 구성되어 있다.

최근의 이동통신 시스템에서 사용되는 신호는 대용량의 멀티미디어 정보를 전송하기 위하여 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)과 넓은 대역을 갖게 된다. 이로 인해 전력 증폭기는 선형성이 보장되는 후퇴된 평균전력에서의 효율과 대역 특성이 중요한 성능 지표가 되고 있다. 기존의 전력증폭기의 선형성 및 효율 그리고 대역을 개선하기 위해서 다양한 연구가 발표되었다. GaN HEMT에 이러한 기술을 적용하려는 다양한 노력들이 이루어지고 있다<sup>[13]~[17]</sup>.

그중에서도, 도허티 증폭기는 현재 기저국용 전력증폭기에 가장 많이 적용되고 있는 기술로서, 다양한 연구 성과를 찾아 볼 수 있다. [그림 3]은 참고문헌 [13]의 도허티 기술을 적용한 GaN HEMT MMIC 전력 증폭기의 사진이다. 입/출력 임피던스 정합회로가 포함된 carrier와 peaking 전력 증폭기와 입력 단에 전력 분배기, 출력 단에 quarter-wave 선로를 포함한 결합기를 갖는 것을 특징으로 한다.



[그림 2] GaN HEMT MMIC 전력 증폭기 사진<sup>[10]</sup>



[그림 3] 도허티 GaN HEMT MMIC 전력 증폭기 사진<sup>[13]</sup>

#### IV. 광대역 도허티 전력증폭기

후퇴된 평균 전력에서의 우수한 효율 개선 특성이 다양한 연구 결과를 통하여 검증된 도허티 전력증폭기는 그 우수함이 인정되어 대부분의 상용 기저국에 적용되고 있다. 그러나 단점으로 10% 이하의 좁은 대역 특성을 갖게 된다.

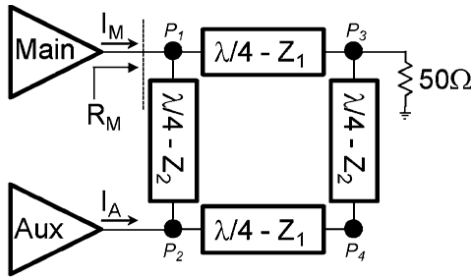
<표 4>에서 볼 수 있듯이, 도허티 전력 증폭기의 대역을 개선하려는 다양한 연구들이 발표되었다<sup>[15]~[19]</sup>. 참고문헌 [15]에서는 [그림 4]와 같은 브랜치 선로 결합기와 유사한 새로운 형태의 출력 결합기를 제안하여 14.3%(1.95~2.25 GHz)의 대역 특성을 성취하였다. 참고문헌 [16]에서는 [그림 5]와 같이 벡터를 바탕으로 설계된 임피던스 변환기를 제안하여 20%(1.8~2.2 GHz)의 대역 특성을 성취하였다. 참고문헌 [17]에서는 [그림 6]과 같이  $\lambda/4$  임피던스 변환기가 제거된 부하 네트워크 회로를 제안하여 22.6%(1.96~2.46 GHz)의 대역 특성을 성취하였다. 참고문헌 [18]에서는 [그림 7]과 같이 quasi-lumped  $\lambda/4$  임피던스 변환기와 klopfenstein taper를 통하여 35.3%(1.96~2.46 GHz)의 대역 특성을 성취하였다. 그러나 이와 같은 연구 결과들은 큰 크기, 회로의 복잡성, 구현의 어려움 그리고 서로 다른 드레인 전압의 사용이란 문제점으로 인해 실제 상용 전력 증폭기 적용에 한계를 가질 수 있다.

이러한 문제를 극복하기 위해 최근 참고문헌 [19]의 논문이 발표되었다. 이 논문에서는 후퇴된 평균 전력에서의 대역특성 최적화를 위하여 기존에 4배 변화하던 임피던스 비

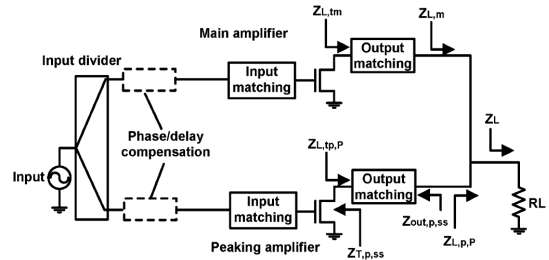
<표 3> 광 대역 도허티 전력 증폭기의 연구 결과 요약

	Ref. [15]	Ref. [16]	Ref. [17]	Ref. [18]	Ref. [19]
Device	CGH60008D	TC23571*	CGH40010F	CGH40045F	CGH40045F
Frequency (MHz)	1.98~2.25	1.8~2.2	1.96~2.46	0.7~1.0	0.75~0.95
Bandwidth (%)	14.3	20	22.6	35.3	23.5
Gain (dB)	8.5~10	14.6~15.3	7~9.8	15.3 (avg.)	14~15.8
Peak $P_{out}$ (dBm)	42	33~	39.8~41.8	49.9 (avg)	48~48.8
DE @ peak (%)	65	49~51**	46~61	67.3 (avg.)	55.4~64.7
DE @ 6 dB BO (%)	48	45.3**	39~44	52~68	51.5~63.8
Drain biases (carrier, peaking)	28V, 28V	N/A	25V, 30V	28V, 53.2V	28V, 28V
Technique	Branch line coupler-type combiner	Varator-based impedance transformer	TLLM*** architecture	Quasi-lumped TL, Klopfenstein taper	Asymmetric load networks

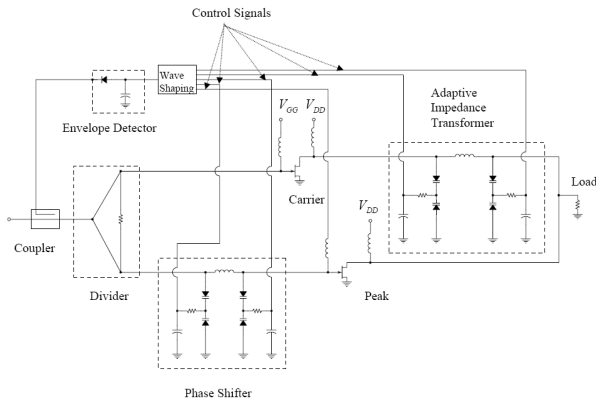
\* GaAs pHEMT transistors, \*\* Power added efficiency (PAE), \*\*\* Transformer-Less Load-Modulated architecture.



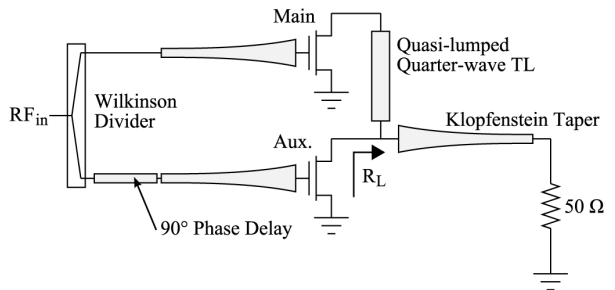
[그림 4] 브랜치 선로 형태의 출력 결합기를 사용한 도허티 증폭기<sup>[15]</sup>



[그림 6] 임피던스 변환기가 제거된 도허티 증폭기<sup>[17]</sup>

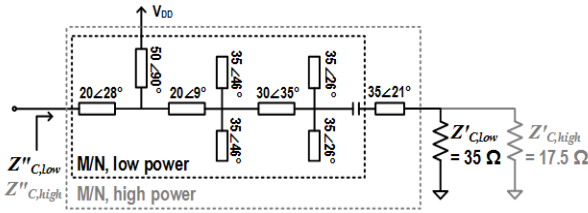


[그림 5] 배터리를 이용한 임피던스 트랜스포머가 적용된 도허티 증폭기<sup>[16]</sup>

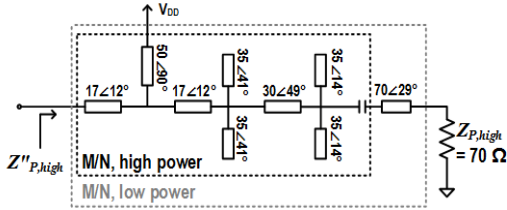


[그림 7] Quasi-lumped  $\lambda/4$  임피던스 변환기와 Klopfenstein taper 가 적용된 도허티 증폭기<sup>[18]</sup>

울을 같게 만들기 위해 최적의 특성 임피던스를 갖는 2개의  $\lambda/4$  임피던스 변환기를 적용하였다. 또한, 이를 구현하기 위하여 [그림 8]과 같이 carrier과 peaking 전력 증폭기가 서로



(a) Carrier 전력 증폭기



(b) Peaking 전력 증폭기

[그림 8] 비대칭 부하 정합 네트워크를 사용한 광대역 도허티 증폭기의 정합 네트워크<sup>[19]</sup>

다른 비대칭 부하 정합 네트워크를 갖도록 구성되었다. 그 결과, 23.5%(0.75~0.95 GHz)의 대역 특성을 성취하였다. 이는 기존의 도허티 전력 증폭기와 유사한 형태의 구조를 통하여 얻어낸 결과이며, carrier와 peaking 전력증폭기에 똑같은 드레인 전압을 사용하는 장점을 갖는다. 이를 통해 실제 응용의 용이성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

## V. 맺음말

GaN HEMT 소자는 개선된 가격 경쟁력과 더불어 대량 생산 능력과 신뢰성 특성 등이 전반적으로 개선됨에 따라 급변하는 이동 통신 시스템에서 적합한 차세대 소자로 강력히 대두되고 있다. 이러한 시점에서 그 동안 발표되었던 GaN HEMT 전력증폭기에 관한 연구 결과들을 요약/소개하였다. 끝으로, GaN HEMT를 이용한 기저국용 광대역 도허티 전력 증폭기에 대한 최신 연구 동향을 소개하였다.

## 참 고 문 헌

[1] M. Rosker, "Recent advances in GaN-on-SiC HEMT reliability and microwave performance within the DARPA WBGs-RF

program", *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symp. Dig.*, pp. 1-4, Oct. 2007.

[2] J. Komiak, "GaN HEMT: Dominant force in high-frequency solid-state power amplifiers", *IEEE Microwave Mag.*, 16, pp. 97-105, Apr. 2015.

[3] E. Mitani, M. Aojima and S. Sano, "A kW-class AlGaIn/GaN HEMT pallet amplifier for S-band high power application", *Proc. European Microwave Integrated Circuits Conf.*, pp. 176-179, Oct. 2007.

[4] E. Mitani, M. Aojima and S. Sano, "An 800W AlGaIn/GaN HEMT for S-band high-power application", *Proc. CS MAN-TECH Conf.*, pp. 14-17, May 2007.

[5] Y.-F. Wu, S. M. Wood, R. P. Smith, S. Sheppard, S. T. Allen, P. Parikh and J. Milligan, "An internally-matched GaN HEMT amplifier with 550-watt peak power at 3.5 GHz", *IEDM Tech. Dig.*, pp. 419-421, Dec. 2006.

[6] K. Kikuchi, M. Nishihara, H. Yamamoto, T. Yamamoto, S. Mizuno, F. Yamaki and S. Sano, "An 8.5-10.0 GHz 310 W GaN HEMT for radar applications", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1-4, Jun. 2014.

[7] W. Nagy, S. Singhal, R. Borges, J. W. Johnson, J. D. Brown, R. Therrien, A. Chaudhari, A. W. Hanson, J. Riddle, S. Booth, P. Rajagopal, E. L. Piner and K. J. Linthicum, "150W GaN-on-Si RF power transistor", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 483-486, Jun. 2005.

[8] B. Kim, M. Greene and M. Osmus, "Broadband high efficiency GaN discrete and MMIC power amplifiers over 30~2,700 MHz range", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1-3, Jun. 2014.

[9] E. Reese, D. Allen, C. Lee and T. Nguyen, "Wideband power amplifier MMICs utilizing GaN on SiC", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 2640-2647, May 2010.

[10] J. Komiak, K. Chu and P. Chao, "Decade bandwidth 2 to 20 GHz GaN HEMT power amplifier MMICs in DFP and No FP technology", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1-4, Jun. 2011.

[11] J. Schellenberg, B. Kim and T. Phan, "W-band, broadband

- 2W GaN MMIC", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1-4, Jun. 2013.
- [12] J. Komiak, S. Wang and T. Rogers, "High efficiency 11W octave S/C- band PHEMT MMIC power amplifier", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1421-1424, Jun. 1997.
- [13] Y. Park, J. Lee, S. Hong, S. Kim, C. Kim, B. Park and B. Kim, "A Doherty power amplifier with a GaN MMIC for femtocell base stations", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 25(3), pp. 187-189, Mar. 2015.
- [14] W. H. Doherty, "A new high efficiency power amplifier for modulated waves", *Proc. IRE*, 24(9), pp. 1163-1182, Sep. 1936.
- [15] R. Giofre, P. Colantonio, F. Giannini and L. Piazzon, "New output combiner for Doherty amplifiers", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 23(1), pp. 31-33, Jan. 2013.
- [16] M. Sarkeshi, O. B. Leong and A. van Roermund, "A novel Doherty power amplifier for enhanced load modulation and higher bandwidth", *MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 763-766, 2008.
- [17] M. Akbarpour, M. Helaoui and F. M. Ghannouchi, "A transformer-less load-modulated (TLLM) architecture for efficient wideband power amplifiers", *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, 60(9), pp. 2863-2874, Sep. 2012.
- [18] D. Y.-T. Wu, S. Boumaiza, "A modified Doherty configuration for broadband amplification using symmetrical devices" *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, 60(10), pp. 3201-3213, Oct. 2012.
- [19] J. Kwon, M. Seo, H. Lee, J. Gu, J. Ham, K. Lee, C. Park and Y. Yang, "Broadband Doherty power amplifier based on asymmetric load matching networks", *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, to be published.

≡ 필자소개 ≡

서민철



2009년 2월: 세종대학교 전자학과 (공학사)  
 2011년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터 (공학석사)  
 2011년 3월~현재: 성균관대학교 IT 융합학과 박사과정  
 [주 관심분야] RF Power Amplifier, Power Amplifier IC Design, Wireless Power Transfer

양영구



1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)  
 2002년 3월~2002년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (박사후 연구원)  
 2002년 8월~2005년 2월: Skyworks Solutions Inc., Senior Electronic Engineer  
 2005년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기공학부 교수  
 [주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 송/수신기 시스템 설계, 비선형 회로 분석 및 시뮬레이션 기법 연구