

# 스케일링이 가능한 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 열 모델에 관한 연구

## Scalable AlGaIn/GaN HEMT's Model Including Thermal Effect

김동기 · 김성호\* · 오재응\*\* · 권영우

Dong-Ki Kim · Seong-Ho Kim\* · Jae-Eung Oh\*\* · Young-Woo Kwon

### 요 약

본 연구에서는 고출력 소자로서 각광받고 있는 AlGaIn/GaN HEMT 2×100 μm 소자(사파이어 기판)에 대해 열 효과가 포함된 대신호 모델링을 수행하였다. 완성된 대신호 모델을 이용하여 9 mm, 15 mm 사이즈 소자로의 스케일링을 통해 전력증폭기를 설계하였으며 제작된 결과와 비교, 해석하였다. 대신호 모델링은 수렴성과 해석 속도면에서 탁월한 장점을 갖는 수식 기반의 경험적 방법을 사용하였다. Pulsed I-V 측정을 통하여 열 모델의 가장 중요한 파라미터인 열 시상수 및 열 저항을 추출하였으며 이를 통하여 완벽한 열 모델 제작이 가능하였다. 제작된 전력증폭기 모듈의 측정결과와 비교를 통하여 본 연구에서 제안된 열 모델이 매우 정확함을 확인할 수 있으며 전력증폭기와 같이 큰 사이즈의 소자를 사용해야 하는 회로의 경우에는 열 효과가 포함된 모델을 사용하여 더욱 정확한 모델링 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

### Abstract

In this paper, 2×100 μm AlGaIn/GaN HEMT's(on sapphire substrate) large signal model including thermal effect was extracted. An equation based empirical model was employed to make large signal model for convergence and high speed. Pulsed I-V measurement was performed to extract thermal resistance and capacitance. Power amplifiers with 9 mm and 15 mm AlGaIn/GaN HEMTs were designed using scaled modeling results of 2×100 μm device respectively. From comparisons between measured and simulated data, the model considering of thermal effects gave better agreement than without one. It demonstrates that thermal modeling must be performed for power amplifier that uses large size transistors.

Key words : Thermal Resistance, Thermal Capacitance, Scaling, GaN HEMT, Power Amplifier, Pulsed I-V

### I. 서 론

최근 통신분야, 자동차, 우주 망원경, 첨단 군사 장비, 원자로 등의 과학 및 상업분야에서는 기존의 전자소자보다 high frequency, high speed, high power이면서 고온, 방사성 및 부식성 분위기 하에서 작동되며 높은 절연성과 열전도도 등의 특성을 동

시에 갖춘 전자소자의 요구 및 필요성이 급증하고 있다. 현재 사용중인 Si를 이용한 IGBT나 GaAs power FET 및 HBT의 경우에는 범용의 응용범위 하에서만 위의 특성을 만족시키고 있는 실정으로, 이러한 특성을 모두 만족시키기 위해서는 기존의 반도체 재료보다 큰 밴드갭을 갖는 반도체 재료를 사용한 소자의 개발이 필요하다. 그 중 특히 청색

서울대학교 전기컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

\*LG전자 CDMA 단말 연구소(CDMA Handset Laboratory, LG Electronics Inc.)

\*\*한양대학교 전자컴퓨터공학부(Department of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20030304-039

· 수정완료일자 : 2003년 5월 7일

광소자가 상용화되어 주목을 받고 있는 III-nitride 반도체는 고효율, 고온작동의 전기소자제작에 이용될 수 있는데 이는 역시 에너지 밴드갭이 커서 문턱 전압이 높고 많은 전류를 수용할 수 있는 동시에 기준에 사용되어지는 소자보다 훨씬 더 높은 온도에서도 동작되기 때문이며,  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  정도의 높은 doping 농도에서 100 KV/cm의 electric field가 가해질 때에도 전자의 peak velocity는  $1.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$  정도의 값을 나타내는 매우 우수한 특성을 나타내고 있다.

그러나 국내에서는 이러한 GaN계 소자에 대한 연구가 아직 미흡한 실정이다. 외국의 GaN계 소자에 대한 연구결과를 살펴보면<sup>[1]-[6]</sup>, 밴드폭을 넓히기 위해 피드백 인덕턴스를 추가하여 class A 동작 영역에서 제작한 전력증폭기의 경우 DC에서 5 GHz까지 9 dB의 소신호 이득과 29.5 dBm의 출력전력, 20%의 효율을 보였다<sup>[1]</sup>. 8 mm 크기의 소자로 제작된 전력증폭기의 경우 현재까지 발표된 결과 중 가장 뛰어난 성능인 6.4 W/mm의 전력밀도 및 51 W의 출력전력을 보이고 있다<sup>[2]</sup>. Cree사에서 제작한 전력증폭기의 경우 12 mm의 소자로 10 GHz에서 설계하여 출력전력 40.7 W, 이득 10.8 dB, 효율 20%의 결과를 보이고 있다<sup>[3]</sup>. GaN계 소자를 이용한 모델링의 경우 수식기반의 방법을 사용하여 정확한 재현성을 보이고 있으며<sup>[4]</sup>, SiC 기관에서 성장시킨 소자를 이용하여 스케일링이 가능한 모델을 완성시켰고<sup>[5]</sup>, 수식을 이용하여 열 효과를 예측할 수 있는 모델이 발표되었다<sup>[6]</sup>. 본 연구에서는 사파이어 기관에서 성장시킨 소자를 이용하여 회로의 성능을 변화시키는 열 효과까지 정확히 모델링 하였으며 또한 스케일링의 정확도를 높여 완벽한 모델링이 가능케 하였다.

본 논문은 열 및 대신호 모델의 개발에 관한 설명(2-1절), 전력증폭기의 설계 및 측정에 관한 설명(2-2절), 열 모델의 타당성 검증(2-3절) 그리고 결론의 순서로 구성되었다.

## II. 본 론

### 2-1 열 및 대신호 모델 개발

전력증폭기의 제작에 앞서 본 연구에서는 이의 근간이 되는 대신호 모델 및 열 모델을 개발하였다.

대신호 모델링은 AlGaN/GaN HEMT  $2 \times 100 \mu\text{m}$ 의 소자를 해석 속도가 빠르고 수렴성이 좋은 수식 기반의 모델을 이용하여 수행하였다<sup>[7]</sup>. 또한 기술의 발전으로 인해 소자의 크기가 점차 작아지면서 나타나는 문제점인 Gm이 가장 큰  $V_{gs}$ 를 표현하는  $V_{pk}$ 가  $V_{ds}$ 에 따라 감소하거나 채널 길이 변조 현상을 표현하는  $\lambda$ 의 경우  $V_{gs}$ 의 영향을 받는 점 등을 고려하여 파라미터의 개수를 추가하여 측정된 모든 바이어스 포인트에서 소신호적인 특성이 측정결과와 일치하도록 했다. 제안된 채널전류의 식은 아래와 같다.

$$I_{ds} = I_{pk}(1 + \tanh(\psi)) \times (1 + \lambda V_{ds}) \times \tanh(\alpha V_{ds}) \quad (1)$$

$$\psi = P_1(V_{gs} - V_{pk}) + P_2(V_{gs} - V_{pk})^2 + P_3(V_{gs} - V_{pk})^3 \quad (2)$$

$$P_1 = P_{10} + P_{11}V_{ds} + P_{12}V_{ds}^2 + P_{13}V_{ds}^3 \quad (3)$$

$$P_2 = P_{20} + P_{21}V_{ds} + P_{22}V_{ds}^2 + P_{23}V_{ds}^3 \quad (4)$$

$$P_3 = P_{30} + P_{31}V_{ds} + P_{32}V_{ds}^2 + P_{33}V_{ds}^3 \quad (5)$$

$$V_{pk} = V_{pk0} + V_{pk1}V_{ds} + V_{pk2}V_{ds}^2 + V_{pk3}V_{ds}^3 \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1V_{gs} + \lambda_2V_{gs}^2 + \lambda_3V_{gs}^3 \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1V_{gs} + \alpha_2V_{gs}^2 + \alpha_3V_{gs}^3 \quad (8)$$

본 연구에서는 300 K, 350 K, 400 K, 450 K에서의 pulsed I-V 측정을 통하여 추출된 온도에 민감한 parameter인  $I_{pk}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{11}$ ,  $P_{20}$ ,  $P_{21}$ ,  $P_{30}$ ,  $P_{31}$ ,  $V_{pk0}$ ,  $V_{pk1}$ ,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ 를 각각 온도에 관한 함수로 표현한 후 열 모델에 적용하였다.

전력증폭기에 사용되는 크기가 큰 소자는 전류가 많이 흘러 열이 발생하므로 온도 상승에 의한 소자의 동작특성이 변화된다. 이러한 현상을 고려하여 본 연구에서는 열 종속회로를 통하여 이를 검증하였다. 그림 1은 열 종속회로의 그림이다.

열 종속회로에서  $I_{th}$ 는 소자에서 소모되는 순간 전력,  $C_{th}$ 는 열 시상수로서 전력이 소모될 때 채널 온도의 과도변화 시간을 나타내며,  $R_{th}$ 는 열 저항으

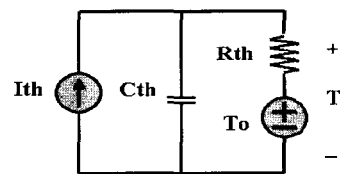


그림 1. 열 종속회로  
Fig. 1. Thermal sub-circuit.

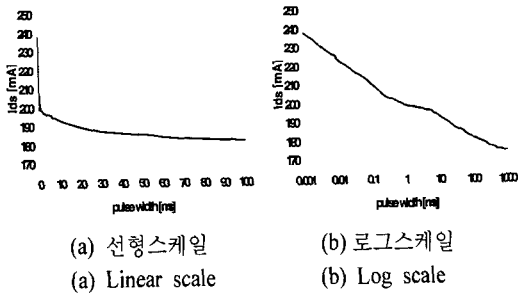


그림 2. 펄스 폭에 따른 채널 전류  
Fig. 2. Channel current versus pulse width.

로서 1 W의 전력이 소모될 때 얼마만큼의 채널 온도가 올라가는가를 나타내는 파라미터이다.  $T_0$ 는 기준온도,  $T$ 는 채널 온도이다.

열 시상수  $C_{th}$ 는 열 저항  $R_{th}$ 와 함께 열 종속회로의 근간이 되는 파라미터이다. 이를 위해서는 pulsed I-V 측정을 통해 펄스의 폭을 변화시키면서 주파수 분산 및 열 분산을 정확히 구분하여야 한다. 일반적으로 열 분산은 pulse width 0.01~1 ms 이후에서 일어난다고 알려져 있다. 그림 2는 pulsed I-V 측정을 통하여 펄스의 폭을 바꾸어가며 채널 전류를 측정된 결과이다. 로그스케일로 본 그림에서 0.001~0.05 ms 사이의 구간에서 펄스 폭이 늘어남에 따라 주파수 분산 효과에 따른 급격한 전류 변화를 확인할 수 있으며 10 ms 이후의 구간에서는 열 분산에 의해 전류의 변화가 일어나고 있다. 전류의 변화가 미비한 구간인 0.05 ms~10 ms에서 선형스케일을 통해 열 시상수  $C_{th}$ 를 23 ms로 추출하였다.

열 저항  $R_{th}$ 를 구하기 위해서는 채널 전류와 채널 온도와의 관계, 채널 전류와 소자 내에서 소모되는 전력과의 관계를 도출하고 결과적으로 채널 온도와 소모 전력과의 관계를 이끌어 내야 한다. 채널 전류와 채널 온도와의 관계는 등온의 pulsed I-V 측정장치에 외부에서 임의의 온도를 인가하여 이끌어 낼 수 있다. 이 때 펄스는 매우 짧은 폭을 가진 상태에서 인가되기 때문에 펄스 신호에 의한 온도의 증가는 없다고 가정한다. 채널 온도와 소자 내에서 소모된 전력과의 관계를 구하는 과정은 아래의 식과 같다.

$$I = f_1(T) \quad (9)$$

$$I = f_2(P) \quad (10)$$

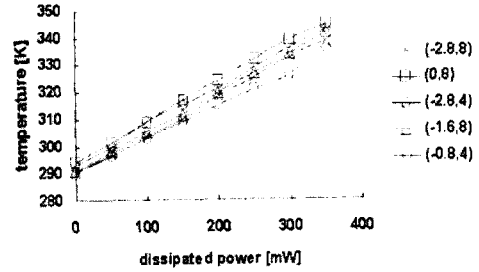


그림 3. 소자 내에서 소모된 전력과 채널 온도와의 관계

Fig. 3. Channel temperature versus dissipated power.

$$f_1(T) = f_2(P) \quad (11)$$

$$T = f_1^{-1}[f_2(P)] \quad (12)$$

그림 3에 다양한 바이어스의 펄스 신호를 인가하였을 때 채널 온도와 소모 전력과의 관계를 나타내었다. 기울기가 열 저항  $R_{th}$ 이며 약 148°C/W이다.

## 2-2 전력증폭기의 설계 및 측정

완성된 모델을 바탕으로 전력증폭기를 설계, 제작하였다. 다양한 결과를 얻고 이를 비교하기 위해 9 mm와 15 mm 두 가지의 소자를 사용하여 중심주파수 1.765 GHz, class AB 동작영역에서 설계하였다. 이는 앞서 완성한 2×100 μm 소자의 모델링 결과를 각각 45배, 75배 선형스케일링한 후, 선형적으로 스케일링이 불가능한 기생성분을 고려하여 완성하였으며 그 타당성은 본 절과 다음절에 기술하도록 하겠다.

제작된 전력증폭기는 0.5 mm의 두께와 유전율 4.6을 갖는 에폭시 기판에서 마이크로스트립 형태로 제작되었다. 게이트 단에 RF 신호의 정합회로를 구성하였으며 드레인 단에 λ/4 단락회로를 구성하였다. 부하는 최대 출력전력을 나타낼 수 있도록 최적화하였다. Chip 상태의 소자를 회로와 연결하기 위하여 와이어 본딩을 실시하였으며 이로 인해 발생하는 인덕턴스를 고려하여 모뎀을 구성하였다. 와이어 본딩은 1 mm당 0.3 nH의 인덕턴스 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그림 4에 15 mm 크기의 소자를 이용하여 제작한 전력증폭기의 시뮬레이션된 소신호 특성과 측정된 소신호 특성을 network analyzer HP8510C를 이용하여 나타냈다. 중심주파

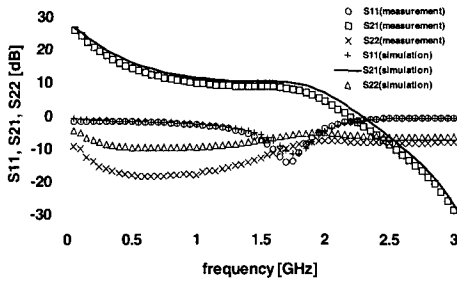
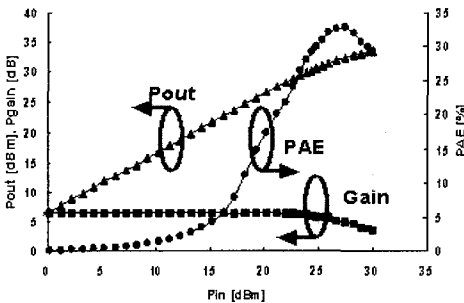
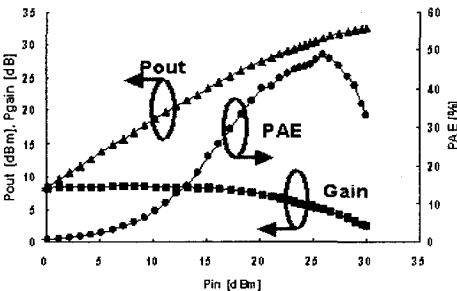


그림 4. 전력증폭기의 소신호 특성  
Fig. 4. Small signal characteristics of power-amplifier.

수 1.765 GHz에서 시뮬레이션 된 소신호 이득은 10 dB, 측정된 소신호 이득은 8.7 dB의 결과를 보였다. 동작 바이어스는 게이트 -4 V, 드레인 12 V이다. 결과를 통해 모델링한  $2 \times 100 \mu\text{m}$  소자의 75배 스케일링이 비교적 정확히 이루어졌음을 확인할 수 있다. 그림 5에 두 가지 사이즈의 소자로 제작된 전력



(a) 9 mm 소자로 제작된 전력증폭기의 특성  
(a) Characteristics of fabricated power amplifier with 9 mm device



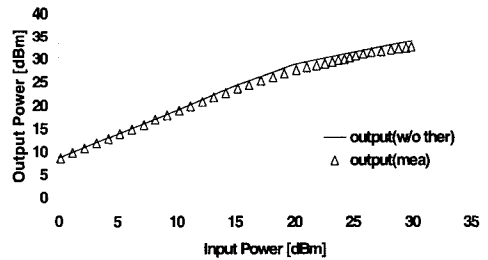
(b) 15 mm 소자로 제작된 전력증폭기의 특성  
(b) Characteristics of fabricated power amplifier with 15 mm device

그림 5. 제작된 전력증폭기의 특성  
Fig. 5. Characteristics of fabricated power amplifier.

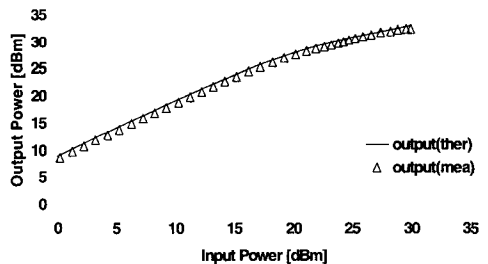
증폭기의 포화 출력전력, 이득, 효율 측정결과를 보였다. 9 mm의 소자로 제작된 회로는 포화 출력전력 32.46 dBm(1.8 W), 평탄 이득 8.5 dB, 최대 효율 4%를 보였고, 15 mm 소자로 제작된 회로는 포화 출력전력 33.5 dBm(2.2 W), 평탄 이득 6.5 dB, 최대 효율 33%를 보였다.

2-3 열 모델의 타당성 검증

제작된 열 모델의 타당성을 검증하기 위하여 출력전력, 효율, 이득의 시뮬레이션 된 결과와 측정결과를 비교하였다. 그림 6은 출력전력에 대하여 열 효과가 포함되지 않은 모델의 시뮬레이션 결과와 측정결과를, 그림 7은 열 효과가 포함된 모델의 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교한 것이다. 그림 8과 9는 이득과 효율에 대해 각각을 비교한 결과이다. 이를 통해 전력증폭기와 같이 큰 사이즈의 소자를 사용해야 하는 회로의 경우에는 열 효과가 포함된 모델을 사용하여 더욱 정확한 모델링 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 10은 제작된 전력증폭기 모듈의 사진이다.

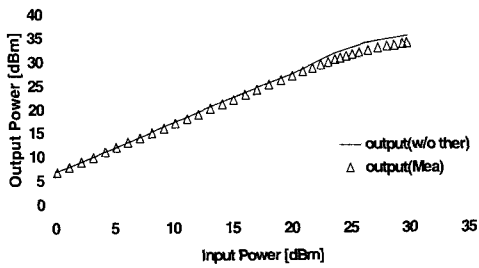


(a) 열 효과를 고려하지 않은 경우  
(a) The model excluding thermal effect

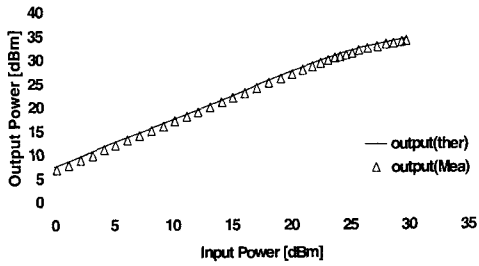


(b) 열 효과를 고려한 경우  
(b) The model including thermal effect

그림 6. 출력전력 특성을 통한 모델 검증(9 mm)  
Fig. 6. Model comparisons for output power characteristics(9 mm).

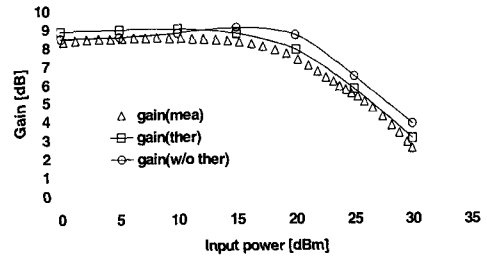


(a) 열 효과를 고려하지 않은 경우  
(a) The model excluding thermal effect

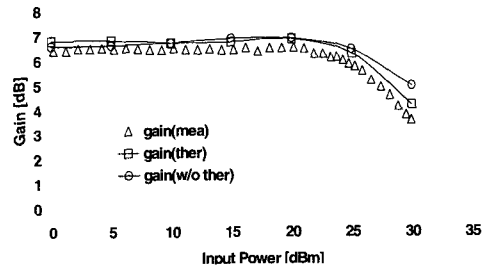


(b) 열 효과를 고려한 경우  
(b) The model including thermal effect

그림 7. 출력전력 특성을 통한 모델 검증(15 mm)  
Fig. 7. Model comparisons for output power characteristics(15 mm).

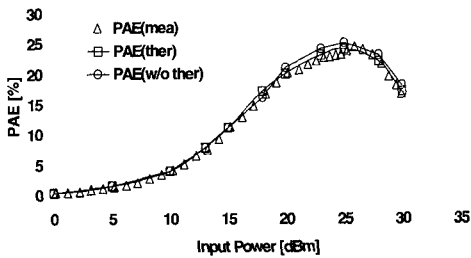


(a) 9 mm 소자를 사용한 경우  
(a) 9 mm device's case

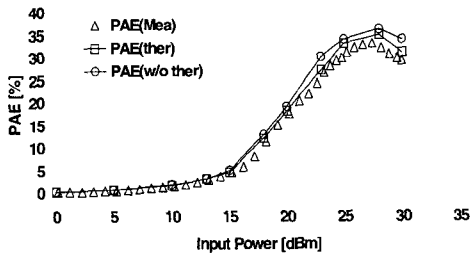


(b) 15 mm 소자를 사용한 경우  
(b) 15 mm device's case

그림 9. 이득 특성을 통한 모델 검증  
Fig. 9. Model comparisons for gain characteristics.



(a) 9 mm 소자를 사용한 경우  
(a) 9 mm device's case



(b) 15 mm 소자를 사용한 경우  
(b) 15 mm device's case

그림 8. 효율 특성을 통한 모델 검증  
Fig. 8. Model comparisons for PAE characteristics.

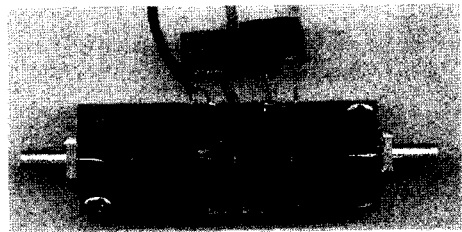


그림 10. 제작된 전력증폭기 모듈의 사진  
Fig. 10. The photograph of fabricated power amplifier module.

### III. 결론

마이크로파/밀리미터파 대역에서 전력증폭기와 같은 비선형 회로를 해석하기 위해서는 능동소자의 대신호 모델링이 필수적이다. 본 논문에서는 고온, 고출력용 소자로서 주목받고 있는 AlGaIn/GaN HEMT 소자의 열 효과가 포함된 대신호 모델을 구현하였다. 본 논문에서는 수렴성이 좋고 해석 속도가 빠른 정형화된 수식을 이용한 경험적 방법의 대신호 모델링을 수행하였다. 대신호 모델링은 열 효

과가 포함된 모델과 포함되지 않은 모델 두 가지를 구현하여 실제로 제작한 전력증폭기와 해석 결과를 비교하였다. 트랜지스터가 회로에서 동작할 때 발생하는 열에 의해 동작특성이 변하는 효과를 고려하여 구현한 모델은 그렇지 않은 모델과 비교하여 측정결과와 매우 잘 일치하고 있다. 이러한 사실로부터 전력증폭기와 같이 큰 사이즈의 소자를 사용하는 회로의 설계 시, 열 효과를 포함하는 모델이 반드시 필요하다는 것을 확인할 수 있다. III-nitride 소자 개발은 여러 선진국들에 비해 최첨단 기술을 선점하는 상징적인 효과뿐만 아니라 시장을 선점하는 경제적인 효과를 가져올 수 있다. 또한 DRAM 산업에만 치우쳐 있는 국내의 반도체 산업의 영역을 확장시켜 자연스런 반도체 산업의 고른 발전을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Y. Chung, S. Cai, W. Lee, Y. Lin, C. P. Wen, K. L. Wang and T. Itoh, "High power wideband AlGaIn/GaN HEMT feedback amplifier module with drain and feedback loop inductances", *IEEE Electronics Letters*, vol. 37, pp. 1199-1200, Sep. 2001.

[2] Y. F. Wu, P. M. Chavarkar, M. Moore, P. Parikh, B. P. Keller and U. K. Mishra, "A 50W AlGaIn/GaN HEMT Amplifier", *IEEE IEDM Technical Digest*, pp. 375-376, 2000.

[3] S. T. Sheppard, W. L. Pribble, D. T. Emerson, Z. Ring, R. P. Smith, S. T. Allen and J. W. Palmour, "High power demonstration at 10GHz with GaN-AlGaIn HEMT hybrid amplifiers", *IEEE Device Research Conference 2000, Conference Digest 58th DRC*, pp. 37-38, 2000.

[4] Bruce M. Green, Hyungtak Kim, Kenneth K. Chu, Hong S. Lin, Vinayak Tilak, James R. Shealy, Joseph A. Smart and Lester F. Eastman, "Validation of an analytical large signal model for AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE High Performance Devices 2000 Proceedings*, pp. 237-241, 2000.

[5] Jong-Wook Lee, Sungjae Lee and Kevin J. Webb, "Scalable large-signal device model for high power-density AlGaIn/GaN HEMTs", *IEEE Trans. On Microwave Theory Tech.*, vol. 2, pp. 69-682, 2001.

[6] John D. Albrecht, P. Paul Ruden, Steven C. Binari and Mario G. Ancona, "AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor model including thermal effect", *IEEE Trans. On Electron Devices*, vol. 47, no. 11, pp. 2031-2036, Nov. 2000.

[7] I. Angelov, H. Zirath and N. Rorsman, "A new empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices", *IEEE Trans. On Microwave Theory Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 2258-2266, Jun. 1992.

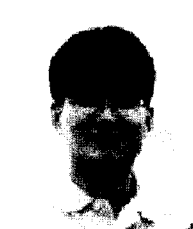
김 동 기



2001년 2월: 성균관대학교 전자공학  
학과 (공학사)  
2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
2003년 3월~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정  
[주 관심분야] 밀리미터파 회로 및

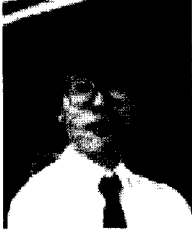
시스템 설계, RF MEMS Antenna, Power combining structure

김 성 호



2001년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)  
2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
2003년 3월~현재: LG 전자 연구원 [주 관심분야] 능동소자 모델링, MMIC 설계

오 재 응



1981년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

1984년: University of Nebraska (공학석사)

1987년: University of Nebraska (공학박사)

1987년~1989년: University of Michigan, Postdoctoral fellow and Research professor

1993년~현재: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수

[주 관심분야] 화합물반도체 고속소자 및 광전자소자, 초고속소자

권 영 우



1988년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)

1990년: University of Michigan (공학석사)

1994년: University of Michigan (공학박사)

1994년~1996년: Rockwell International Science Center, MTS

1996년~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 부교수, 서울대학교 3차원 밀리미터파 연구단장

[주 관심분야] MMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템, 능동소자 모델링, RF MEMS, Microwave cancer detecting