선박 레이더용 X-대역 300 W급 GaN HEMT 반도체 전력 증폭 장치 설계 및 제작

Design and Fabrication of X-Band GaN HEMT SSPA for Marine Radar System

허 전 · 진형석 · 장호기* · 김보균* · 조숙희**

John Heo · Hyeong-Seok Jin · Ho-Ki Jang* · Bo-Kyun Kim* · Sookhee Cho**

요 약

본 논문에서는 GaN HEMT 소자를 이용한 X-대역 반도체 전력 증폭 장치(SSPA)의 설계 및 제작에 대하여 논의한다. 반도체 전력 증폭 장치는 안정적인 전원을 공급해 주는 전원공급기, 통신과 내부 모듈을 제어하기 위한 제어부, RF 신호를 증폭하기 위한 RF부로 구성된다. 특히, RF부를 구성하는 능동 소자로 TriQuint사의 GaN HEMT Bare 소자를 이용하였다. RF부는 초단, 드라이브 단, 메인 출력 단으로 구성되어 있으며, 각 앰프는 입·출력 정합을 통하여 구현하였다. 제작된 반도체 전력 증폭 장치는 X-대역(500 MHz 대역폭)에서 duty 26 %, 최장 펄스 100 us 조건에서 300 W 이상의 출력을 얻을 수 있었으며, 향후 선박용 레이더 시스템에 적용할 예정이다.

Abstract

In this paper, design and fabrication of solid state power amplifier(SSPA) using GaN HEMT chip for X-band frequency are presented. The SSPA consists of the power supply for stable power and the control unit for communication and controlling the internal module, the RF Part to amplify RF signal, In particular the adopted active device for the RF Parts is GaN HEMT Bare chip of TriQuint company, the RF parts consists of pre-stage, drive-stage, main power-stage and each amplifier is designed with input and out matching circuit. The developed power amplifier demonstrated more than 300 W peak output power in condition of 26 % duty, max. pulse width 100us for the X-band frequency(500 MHz bandwidth) and can apply to marine radar systems.

Key words : GaN, SSPA, MTBF, Duty Cycle, MTI

I. 서 론

레이더 시스템은 전파의 반사 및 산란 특성을 이용하여 목표로 하는 물체의 방위와 거리를 계산하여 위치에 관한 정보를 얻기 위한 장치이다. 따라서 논

에 보이지 않는 먼 거리의 물체를 탐지하기 위해서는 필연적으로 높은 출력을 요구하여 있으며, 이러한 출력을 내기 위해서 클라이스트론, 마그네트론, TWTA 등 각종 진공관이 사용되었다. 그러나 이런 증폭기들은 큰 출력을 낼 수 있으나, 낮은 MTBF, 높은 전

LIG넥스원 ISR 연구센터(LIGNex1 ISR R&D Lab.)

*(주)유텔 기술연구소(U-tel Research and Development Center)

**STX엔진(주) 전자통신연구소(STX Engine Electronics & Telecommunications Research Center)

· Manuscript received September 5, 2012 ; Revised September 26, 2012 ; Accepted October 30, 2012. (ID No. 20120905-103)

· Corresponding Author : John Heo (e-mail : johnheo5@lignex1.com)

압 사용, 낮은 주파수 대역폭 등 그 효율성과 신뢰성이 낮다는 단점이 있었다. 이를 극복하자 반도체 소자 및 설계 기술의 발전을 바탕으로 레이더 송신기를 반도체 소자로 대체하려는 연구 노력이 활발하게 진행되어 점차 중, 단거리 레이더 시스템에서 SSPA 송신기의 사용이 늘어나는 추세이다^{[1][2]}. SSPA는 상대적으로 긴 MTBF, 낮은 전압 사용, 넓은 대역폭, 소형, 경량화 등 많은 장점을 가지며, 진공관 앰프와 비교하여 낮은 peak 출력을 가지는 단점을 가지고 있으나, 상대적으로 긴 duty cycle로 인한 average 출력의 증가로 레이더 시스템을 구성할 수 있는 충분한 조건을 만족시킬 수 있다^{[3][4]}. 기존의 반도체 전력 증폭 장치는 GaAs PHEMT 소자가 주로 사용되어 왔고, 소자의 낮은 출력으로 인한 한계로 X-밴드에서 사용시 수십 W 수준이며, 그 이상의 출력을 내기 위해서는 소자 수의 증가로 인한 결합 손실의 증가로 급격하게 효율이 감소하며 크기 또한 커지게 된다. 그러나 최근 GaN 전력소자에 많은 연구가 진행되었고, GaN의 WideBand Gap 특성으로 인한 높은 항복 전 압으로 인한 고출력, 고효율을 얻을 수 있으며, 높은 열전달 계수를 가지고 있어 방열에 있어서도 유리하다^[5]. 따라서 전력증폭기 관련 분야에서도 수십~수백 W급의 GaN 기반의 고출력 소자가 등장하여 이미 국내에서 이 소자를 이용한 수 kW급 S-밴드용 SSPA 제작에 성과가 있었고^[6], X-밴드 대역에서도 GaAs 소자와 GaN MMIC를 사용한 반도체 전력 증폭 장치가 설계/제작되었다^[7]. 본 논문에서는 모든 RF 소자를 GaN HEMT Bare 칩을 이용하여 X-밴드, 최대 Duty Cycle 26 %를 가지는 고출력 반도체 전력 증폭장치 설계와 제작에 관한 내용을 기술하였다. 먼저 II 장에서는 반도체 전력 증폭 장치의 시스템 설계 및 전체적인 구성에 대해서 이야기하였으며, III 장은 RF부의 세부 설계를 다루었다. 특히 RF부를 구성하는 모든 고출력 증폭 소자는 Triquint사의 GaN HEMT Bare 칩을 이용하여 입출력 정합회로 및 로드풀 테스트를 통하여 구성된 단위 증폭기를 입출력 특성과 격리도 성능이 우수한 90도 하이브리드 분배/합성기로 설계하여 제작/적용하였다. IV 장에서는 반도체 전력 증폭 장치 제작 및 측정에 대한 논의, 마지막 V 장에서는 결론을 논의한다.

II. 반도체 전력 증폭 장치 설계

2-1 반도체 전력 증폭 장치 설계

설계된 반도체 전력 증폭 장치는 외부에서 최대 Duty Cycle 26 %, 0 dBm의 RF 신호를 입력받아 300 W의 고출력 RF 펄스 신호로 증폭하는 기능을 한다. 이런 기능을 수행하기 위해서 반도체 전력 장치는 그림 1과 같이 외부 AC 단상 전원을 DC로 변환하는 전원부, DC/DC 변환 및 외부 통신 및 내부 제어를 위한 제어기로 구성되는 /제어부, RF 증폭을 담당하는 RF부로 나눌 수 있으며, 각 부분의 기본 설계는 다음과 같다.

2-1-1 전원부 기본 설계

반도체 전력 증폭 장치의 전원은 AC 220 V(110 V) 단상을 입력 받아 전원 공급 모듈을 통하여 DC 36 V, 5 V 신호로 변환한다. 외부 입력 전원 및 출력 전원을 체크하기 위한 자체 Bit 신호를 생성하여 그 결과를 제어기로 전송하여 최종 사용자의 콘솔에 서 볼 수 있게 하였으며, 또한 장치 외부 LED를 통하여 전원 이상 유무를 체크할 수 있다. 36 V 전원은 최종 증폭 소자에 사용될 main 전원으로써 RF부 전원의 ripple 및 noise를 최대한 억제해야 된다. 전원의 특성에 따라서 최종 RF의 출력 신호에 바로 영향을 미치게 되어 RF 앰프와 가능한 근접한 곳에 linear regulator를 거쳐 32 V로 전환되며, ripple 및 noise를 제거하여 안정적인 전원을 VDS bias로 인가하게 된다. 5

그림 1. 반도체 고출력 장치 구성
Fig. 1. Block diagram of designed SSPA.

그림 2. VDS bias 설계

Fig. 2. Timing diagram of VDS bias.

V 전원은 1차적으로 제어기 작동에 필요한 전원 공급을 해주며, 직접 제어기로 공급이 되어 36 V의 전원과 독립적인 전원 경로를 구성하게 된다. 따라서 36 V 전원에 이상이 생기게 되었더라도 제어기는 외부와 통신 상태를 유지하게 된다. 또한, 5 V 전원은 증폭 소자에 필요한 전원을 생성하게 되는데, 고출력 앰프의 VGS를 bias 시키기 위해서 전원 보드 1에서 음 전원(-5 V)를 생성하게 되며, 이는 전원 보드 2에서 -4~-3.2 V를 생성하여 초단, 구동, 고출력 증폭기에 최적인 VGS 전압을 생성하게 된다. 전원 스위치 보드의 주요 역할은 그림 2와 같이 RF amp에 bias된 VDS 전압을 pulse 형태로 구동하기 위한 스위치 회로로 구성하여 RF 신호와 동기화 하여 VDS_on 신호를 인가 받아 RF 증폭 시에만 VDS Bias 전압을 on 시켜 대기 상태 및 비 송신 시 발생되는 대기 소모 전류를 줄인다.

2-1-2 제어부 기본 설계

제어부는 외부 장치와의 통신 및 내부 모듈의 제어를 담당한다. RS422 Serial 통신을 통하여 상위 장치의 명령을 받고, 이 명령을 반도체 전력 증폭기의 내부 모듈을 제어하기 위하여 TTL 형식으로 변환하여 각 장치를 제어하며, 각 내부 모듈의 상태 정보를 취합하여 이를 상위 장치로 전송하여 최종적으로 사용자가 반도체 전력 증폭기의 이상 유무를 실시간으로 체크를 하게 된다. 또한, LED를 점등시켜 외부와 통신이 불가능한 상황에서도 장치의 이상 유무를 체크할 수 있게 한다.

2-1-3 RF부 기본 설계

반도체 전력 증폭 장치의 주요 임무를 담당하는 RF 신호 증폭 기능은 RF부에서 수행되며, 크게 초단, 드라이브단, 고출력단 3부분을 거쳐 최종적으로 300 W(54.8 dBm) 이상의 고출력을 얻는다. 그림 3에서는 반도체 전력 증폭 장치의 power-budget을 나타냈다. 초단 증폭부는 최초 RF 신호가 입력되는 부분으로, 소 신호 RF 신호를 증폭하는 기능을 수행한다. 주파수에 상관없이 드라이브 단의 출력을 1dB 지점까지 증폭할 수 있게 충분한 gain을 가지게 설계해야 하며, 이를 위해서 3단으로 cascade하여 구성하였으며, 모두 Linear 영역에서 동작하게 한다. 온도에 따른 gain 차이를 해소하기 위해서 Thermal Pad를 장착하여 최종적으로 0 dBm의 신호를 입력 받아 34 dBm의 출력 신호를 발생시킨다. 드라이브 단은 초단에서 입력받은 RF 신호를 증폭하며 최종 출력단을 saturation시킬 수 있게 높은 출력을 낼 수 있어야 한다. 이를 위해서 저 손실의 분배/결합기를 통하여 출력을 높였고, 포트 간의 격리도 특성 향상을 위하여 각 출력단에 isolator를 사용하여 최종 51 dBm까지 증폭한다. 마지막으로 고출력 증폭단은 드라이브 단의 신호를 받아 최종 고출력 신호로 송신하는 기능을 한다. 고출력 앰프는 총 16개로 구성되어 있고, 최적화된 결합기를 이용하여 손실이 최소가 되도록 설계되어 최종 300 W(54.8 dBm) 이상의 출력 레벨

그림 3. 반도체 전력 증폭 장치 RF 구성도

Fig. 3. RF block diagram of SSPA.

그림 4. 반도체 전력 증폭 장치 방열 결과
Fig. 4. Radiate heat result of SSPA.

을 얻는다.

2-2 반도체 전력 증폭 장치 하우징 설계

반도체 전력 증폭 장치의 전기적인 성능을 만족하기 위해서는 단순한 RF 소자 및 배치뿐 아니라, 소자가 내는 열을 효과적으로 방열할 수 있는 구조 설계가 이루어져야 한다. 일반적으로 RF 앰프는 온도가 상승할 때 이득의 저하, 발진 가능성의 증가, MTBF의 감소가 발생을 하게 된다. 그림 4에서는 반도체 전력 증폭 장치의 방열 성능을 알아보기 위해서 반도체 전력 증폭 장치의 밑면을 이루고 있는 방열판(heat sink)에 RF 소자 위치 및 방열을 모사하여 simulation을 실시하여 그 결과를 도식하였다. 실제 시스템에 적용되는 랙 조립체를 모사하여 수행하였으며, 200CFM 팬 4개 및 내부 최고기는 63도를 기준으로 실험한 결과, Baseplate 기준으로 89도 이내의 결과를 얻을 수 있었다. 이는 최소 앰프의 life time $8E+10$ 시간을 확보하였음을 확인하였고^[8], 실내에서 운영하는 환경을 고려할 때 충분한 열적 안정성을 확보할 것으로 보인다.

Ⅲ. 반도체 전력 증폭 장치 RF부 설계 및 제작

3-1 단위증폭기 설계

단위증폭기에 사용된 소자는 Triquint사의 Bare 칩을 사용하였다. 주요 특징으로 SIC 0.25 μm 공정으로 제작된 GaN 소자로써 높은 전력 밀도와 높은 항복전압을 가져 높은 내구성과 장 펄스 송신에 적합하다. 표 1에서 X-band에서 소자들의 특징을 요약하였다. 그림 5에서는 초단 증폭기의 정합 회로에 대한 기본적인 설계 결과이다. 설계된 PCB 기판은 실제 제품에 실장될 수 있는 크기를 고려하여 Alumina 5 mil 고 유전율 기판을 이용하여 최소화시켰으며 DC 바이어스 라인에서 최대한의 격리도를 확보하기 위해서 open stub 및 short stub로 구성하였다. 최종 시뮬레이션 결과를 볼 때 초단 앰프 1의 이득은 14 dB, 초단 앰프 2에서의 이득은 12.5 dB를 얻을 수 있

표 1. Triquint Bare chip 성능

Table 1. The performance of Triquint Bare chips.

구분	초단증폭기		고출력 증폭기
	TGF2023-01	TGF2023-02	TGF2023-10
Frequency	X-band		
Psat.	37.4(dBm)	40.2(dBm)	45.8(dBm)
Gain(Psat.)	10.7	9.9	8.9
PAE(Max.)	54 %	52 %	47 %
Vdg(Max.)	80 V		
Technology	0.24 μm Power GaN On sic		
Dimension(mm)	0.82×0.66×0.10	0.82×0.92×0.10	0.82×2.48×0.10

그림 5. 초단 증폭기 설계

Fig. 5. Design of pre-stage amplifier.

그림 6. 90도 hybrid 결합기 설계
Fig. 6. Design of branch line hybrid coupler.

그림 7. 고출력 증폭기 설계
Fig. 7. Design of high power amplifier.

그림 8. 4 way T형 분배/결합기 설계
Fig. 8. Design of 4way T-junction divider/combiner.

있으며, 두 종류의 앰프를 이용하여 초단에서 3단으로 cascade하여 linear 영역에서 증폭, 최종 34 dBm의 출력을 얻는다. 드라이브단 및 고출력단에서 사용되는 앰프는 동일 회사 제품인 TGF2023-10의 Bare 칩을 사용하였다. 이 bare 칩은 load-full 테스트를 거쳐 40 W 이상의 출력을 낼 수 있음을 확인한 바 있으며^[9], 실제 제품에 적용할 수 있게 bias 회로 구성 및 결합기를 통하여 얼마나 더 높은 출력을 낼 수 있는지가 주요 설계 고려사항이었으며, 앰프를 어떻게 전력 분배/합성할 것인가가 성능에 주요한 영향을 미치게 되는 요인이 된다. 통상 앰프를 병렬로 결합할 때 모든 앰프의 위상과 출력이 동일하지 않기 때문에, 설계 시 입출력 신호의 위상과 크기에 따라서 출력 신호가 크게 영향을 받지 않는 것이 전제 조건이었다. 일반적으로 90도 hybrid coupler가 wilkinson 전력 분배/합성기보다 신호의 위상과 크기의 차이에 크게 민감하지 않고 입출력 정합이 용이하기 때문에, 최종적으로 90도 hybrid coupler를 적용하기로 하였다. 그림 6에서 90도 하이브리드 전력 합성기의 simulation을 실시하여 insertion loss가 0.2 dB 이내의 결과를 얻을 수 있었으며, 이 결과를 통하여 그림 7에서 90도 hybrid coupler를 이용하여 하이브리드 평형 증폭기 구조로 구성할 때 출력의 변화를 확인하였다. 시뮬레이션시 100 W급의 출력을 얻을 수 있었다. 이는 실제 제작되었을 시 기관 유전율의 불균일성 및 RF 급전 line의 손실, RF 패턴의 오차 등을 고려하지 않은 이상적인 결과라 볼 수 있다. 이 앰프는 드라이브단 및 고출력단에 사용되며, 분배/결합기를 통하여 최종 더 높은 출력을 얻을 수 있었다. 고출력단의 최종결합 방법은 2 way, 4 way 결합기를 통하여 고출력 앰프로 각기 급전하고, 앰프의 증폭 신호의 결합은 그 역순이다. 분배/결합기는 T-Junction 형태를 사용하게 되었고, 그 이유는 실제 구현하기가 쉽고 고출력 앰프의 출력단에 증폭소자의 보호와 동작 안정성을 위해서 Isolator를 삽입하여 앰프 간 포트 격리도를 확보하였기 때문이며, 공간상의 제약을 고려하였기 때문이다. 그림 8에서는 4 way T-Junction 결합기에 대한 시뮬레이션 내용이다. 시뮬레이션에 사용된 PCB 기관은 X-밴드에서 저 손실 특성을 가져야 하며, 높은 출력 및 Long Duty Cycle로 인한 발열을 효과적 기구물로 전달 할 수 있게 높은 열전도성을

그림 9. 증폭기 제작 사진
Fig. 9. Photo for RF amplifier.

가져야 한다. 이런 특성을 고려하여 최종적으로 Taconic사의 TLY5A, 20 mil을 사용하였고 최종 시뮬레이션 결과, 삽입 손실은 0.5 dB 이내의 결과를 얻을 수 있었다.

3-2 단위 증폭기 제작

그림 9에서는 제작된 단위 증폭기 형상을 보여준다. 증폭기 설계 주안점은 탈부착이 손쉽게 단위 조립체 형태로 제작하였다. 따라서 밑면을 carrier 형태로 제작하였으며, 전기적, 열전도를 고려하여 구리-텅스텐 합금으로 구성하였다. 여기에 증폭기 PCB 부착 및 전원 급전부를 구성하여 와이어 Bonding을 통하여 VDS 및 VGS 전원을 공급한다. 테스트 및 조립시 나사 형태로 반도체 전력 증폭 장치의 하우징에 바로 조립이 될 수 있게 제작하였으며, 크기는 초단 증폭기 16.0×15.0 mm, 고출력 증폭기 30.1×25.5 mm이다. 제작된 조립체의 출력을 확인한 결과, 전단증폭기 1, 2의 최대 출력 36.5 dBm(4.5 W), 41 dBm(12.5 W)의 출력을 얻을 수 있었으며, 고출력 증폭기는 isolator를 포함하여 최종 47.8 dBm(60 W) 이상의 출력을 얻을 수 있었다.

IV. 반도체 전력 증폭 장치 제작/측정

4-1 반도체 전력 증폭 장치 제작

선박 레이더에 적용이 가능하도록 전기적 기계적 인터페이스를 고려하여 설계된 반도체 전력 증폭 장치의 형상은 그림 10과 같다. 전체 크기는 360×310×115 mm(손잡이 미포함)이고, 무게는 약 11 kg이다.

그림 10. 반도체 전력 증폭 장치 전면
Fig. 10. A front view of SSPA.

그림 11. 반도체 전력 증폭 장치 측면
Fig. 11. A side view of SSPA.

장착 및 이동이 용이하도록 제작되었으며, 증폭기 및 상부에 있는 전원변환부에서 발생하는 열을 효과적으로 방열시키기 위해서 상하부에 방열핀을 장착하였다. RF 입력 신호는 SMA 커넥터, 전원 제어는 Circular 커넥터를 이용하였으며, 최종 RF 출력은 그림 11에서와 같이 도파관으로 연결되는 구조로 제작하여 최종 안테나까지 가능한 손실 없이 급전하도록 하였다.

4-2 반도체 전력 증폭 장치 측정

본 논문에서는 전체 장치 특성을 분석하기 위해서 출력을 측정/분석하였다. 그림 12에서 반도체 전력증폭기의 pulse width에 따른 출력 특성을 나타내었다. 측정 결과, 220AC 단상 전압을 인가 후 입력 RF pulse를 최대 duty cycle 26 %, 최대 펄스폭 100 us일 때 F_c (중심 주파수)에서 55.7 dBm(370 W)의 출력 결과를 보여주고 있다. 또한, 근거리 선박을 감시하기 위한 최단 펄스폭인 50 ns에서의 peak 출력을 확인하였을 때 장 펄스와 다르게 삼각파처럼 출력되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 peak 출력까지 가는 rising time이 50 ns 이상이기 때문에 peak 출력에 도

(a) 출력 전력: 55.7 dBm
P.W: 100 us, duty: 26 %

(a) 출력 전력: 55.2 dBm
P.W: 50 ns, duty: 10 %

그림 12. 송신 출력 파형(Fc)

Fig. 12. Waveform of the transmit output at center frequency.

그림 13. X-대역 출력 특성

Fig. 13. The output characteristic at X-band.

달되지 않고 falling이 되기 때문으로 분석되며, 이 결과, 중심 주파수(Fc)에서 0.5 dB가 낮은 55.2 dBm (330 W) 출력을 확인할 수 있었다. 그림 13에서는 주파수별 출력 결과를 나타내었다. 전 대역에서 설계 목표치인 54.8 dBm 이상의 결과를 얻을 수 있었으

그림 14. 위상 및 진폭 편차

Fig. 14. The variation of phase and amplitude.

며, 0.6 dB의 출력 편차를 확인하였다. 또 다른 특성인 펄스 간 안정도를 알아보기 위해서 진폭 및 위상 편차를 측정하였다. 이 특성은 레이더 시스템의 MTI (Moving Target Indication) 지표와 관련이 있는 항목으로 출력 전력의 흔들리는 정도를 나타내며, 레이더 시스템에서 클러터 식별할 수 있는 능력을 의미하며 MTI 지수로 표현될 수 있다^[10]. 만일 전원 및 RF 부의 설계가 제대로 되지 않는다면 출력 시 진폭 및 위상의 흔들림이 심해지며, 레이더 시스템의 MTI 지수가 악화된다. 그림 14에서는 Fc 주파수에서의 위상 및 진폭 편차를 도식한 결과이다. 중심 주파수에서 진폭편차 0.0012 dB 이내, 위상편차 0.011Deg. 이내를 확인할 수 있었으며 이는 MTI 지수 70 dB 이상에 해당하는 것으로 높은 출력 안정성을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문은 선박용 레이더 시스템에 적용하기 위하여 GaN 소자를 이용한 X-대역 반도체 전력 증폭 장치 설계 및 제작에 대해서 논의하였다. 표 2에서 제작된 반도체 전력 증폭 장치의 성능에 대한 요약 표이다. X-밴드 주파수 대역에서 설계 목표치인 54.8 dBm(300 W) 이상의 출력을 만족하였고, 단 펄스 출력 특성도 만족하였다. 이는 최대 탐지 거리에 필요한 충분한 출력 및 초 단거리 표적을 식별할 수 있는 능력을 제공할 수 있으며, 특히 최대 Duty Cycle 26

%에서도 안정적으로 300 W 이상의 출력을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 논의된 반도체 전력 증폭 장치는 무게, 크기, 안정적인 전기적 성능을 볼 때 기존의 선박 레이더에 사용되어 유지 보수 및 수명이 짧았던 TWTA 같은 Tube 형태의 송신기 앰프를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

표 2. 반도체 전력 증폭 장치 성능

Table 2. The performance of X-band 300 W SSPA.

구분	성능	비고
주파수 범위	$F_c \pm 250$ MHz	X 대역
최대 듀티비	26 %	
최대 펄스폭	100 us	
최소 펄스폭	50 ns	
출력 전력	54.8 dBm(300 W)	Min.
위상 편차	0.020 Deg	Max.
진폭 편차	0.002 dB	Max.
동작 전압	단상 220 V(110 V)	
무게	11.2 kg	
크기	360×310×115 mm	

참 고 문 헌

- [1] S. T. Allen, R. A. Sadler, T. S. Alcom, J. W. Palmour, and C. H. Carter, "Silicon carbide MESFETs for high-power S-band application", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest 1997*, vol. 1, pp. 57-60, Jun. 1997.
- [2] M. van Heijningen, G. C. Visser, J. Wurfl, and F. E. van Vliet, "S-band AlGaIn/GaN power amplifier MMIC with 20 watt output power", *Microwave Integrated Circuit Conf. 2008*, pp. 79-82, Oct. 2008.
- [3] P. Lanzkron, E. Brookner, "Solid state X-band airport surface surveillance radar", *IEEE Radar Conf. 2007*, pp. 670-676, Apr. 2007.
- [4] M. Casto, M. Lampenfeld, Jia. Pengcheng, P. Courtney, S. Behan, P. Daughenbaugh, and R. Worley, "100 W X-band GaN SSPA for medium power TWTA replacement", *IEEE Wireless & Microwave Technology Conf. 2011*, pp. 1-4, Apr. 2011.
- [5] U. K. Mishra, P. Parikh, and Wu Yi-Feng, "Al-GaN/GaN HEMTs-an overview of device operation applications", *Proc. of IEEE*, vol. 90. no. 6, pp. 1022-1031, Jun. 2002.
- [6] 이정원, 임재환, 강명일, 한재섭, 김종필, 이수호, "레이더용 S대역 GaN 반도체 전력 증폭 장치 설계 및 제작", *대한전자과학회지*, 22(12), pp. 1139-1147, 2011년 12월.
- [7] 김민수, 이춘성, 이상록, 이영철, "X-대역 펄스 압축 Solid State Radar를 위한 200 W SSPA 개발", *대한전자공학회지*, 46(12), pp. 22-29, 2009년 12월.
- [8] <http://www.triquint.com/products/p/TGF2023-10>
- [9] 정해창, 오현석, 염경환, 진형석, 박종설, 장호기, 김보균, "사전-정합 로드-풀 측정을 통한 X-대역 40 W급 펄스 구동 GaN HEMT 전력증폭기 설계", *한국전자과학논문지*, 22(11), pp. 1034-1046, 2011년 11월.
- [10] Merrill Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd Edition, McGraw-Hill, pp. 2.92-2.94, 2008.

허 전

시스템

2002년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
 2004년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2004년 2월~현재: LIG넥스원 ISR 연구센터 선임연구원
 [주 관심분야] 반도체 전력 증폭 장치 설계/능동 위상 배열 레이더

진 형 석

2000년 8월: 광운대학교 전파공학 전공 (공학석사)
 2000년 8월~현재: LIG넥스원 ISR 연구센터 수석연구원
 [주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계/ 능동 위상 배열 레이더 시스템

장 호 기

1998년 2월: 동양공업전문대학 전자과 (공학사)
1998년~2001년: (주) 케이엠더블유 연구소 연구원
2001년~현재: (주) 유텔연구소 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 능동 회로

조 숙 희

1999년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학사)
2001년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학석사)
2007년 2월: 금오공과대학교 전자통신공학과 (공학박사)
2007년 12월~현재: STX엔진(주) 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 RF 통신

김 보 균

2011년 2월: 순천향대학교 전기통신과 (공학사)
2011년~현재: (주)유텔연구소 연구원
[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 RF 통신