

2014년 12월

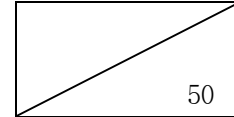
14ZB1100-01-8051P

수요자 중심 화합물반도체 부품산업기반 강화

Establishment of Basis for Compound Semiconductor
Components Technology Based on Industrial Demand

2014년 12월

14ZB1100-01-8051P



수요자 중심 화합물반도체 부품산업기반 강화

Establishment of Basis for Compound Semiconductor Components

Technology Based on Industrial Demand

인 사 말 씀

유무선통신 시스템은 정보통신기술의 급격한 수요 증대에 따라 주파수 대역과 속도면에서 비약적으로 발전해 왔으며 유무선 통신 시스템의 송신수신을 위한 Front-End에는 고속/고주파 특성과 수광/발광 특성을 활용하는 화합물 반도체 기반의 전자소자와 광소자가 필수적으로 사용되고 있으며 기술의 고난이도와 국가적 기술 전략성 때문에 국내외적인 많은 관심을 받고 있습니다.

화합물반도체 기반의 초고주파부품은 그 특성상, 소량 다품종의 전형적인 중소기업 생산 형태를 취하고 있으나, 우리나라 초고주파 부품기업의 영세성과 낮은 기술 수준 등으로 국내 초고주파부품 분야의 경쟁력이 극히 취약하고 전량을 수입에 의존하는 구조적인 문제를 내포하고 있습니다. 따라서 R&D 기술과 소요 산업기술을 직접적인 연계함으로써 산업기술의 수준을 강화하고, 수요자 중심의 부품을 개발함으로써 TTM (Time-To-Market) 제품을 효과적으로 확보할 수 있는 국가주도의 종합적인 활성화 정책이 절실한 시점입니다. 본 연구사업을 통해서 화합물반도체 기반의 초고주파 부품산업의 허브를 구축하고 전주기적 연구수행 체계를 구축함으로써 국내 초고주파부품 산업의 활성화를 통한 국제적 경쟁력 강화에 크게 기여할 것으로 기대됩니다.

끝으로, 본 연구과제 수행을 위해 후원을 해주신 연합이사회 산업기술연구회 관계자 및 한국전자통신연구원 관계자 여러분께 깊은 감사를 드리며, 아울러 본 연구과제를 성실히 수행한 연구원들의 노고를 치하하는 바입니다.

2014년 12월

한국전자통신연구원 원장 김 홍 남

제 출 문

본 연구보고서는 일반사업 연구과제인 "수요자 중심 화합물반도체 부품산업 기반강화"의 결과로서, 본 과제에 참여한 아래의 연구팀이 작성한 것입니다.

2014년 12월

연구책임자 : 책임연구원 강동민 (RF 융합부품연구실)
연구참여자 : 책임연구원 김해천 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 주철원 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 윤형섭 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 이경호 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 민병규 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 김동영 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 이상홍 (RF 융합부품연구실)
 책임연구원 이종민 (RF 융합부품연구실)
 선임연구원 김성일 (RF 융합부품연구실)
 선임연구원 안호균 (RF 융합부품연구실)
 선임연구원 윤기홍 (광집적플랫폼연구실)
 연구원 조규준 (RF 융합부품연구실)

요 약 문

I. 제 목

수요자 중심 화합물반도체 부품산업기반 강화

II. 연구목적 및 중요성

화합물반도체 기반의 초고주파부품은 그 특성상, 소량 다품종의 전형적인 중소기업 생산 형태를 취하고 있으나, 우리나라 초고주파 부품기업의 영세성과 낮은 기술 수준 등으로 국내 초고주파부품 분야의 경쟁력이 극히 취약, 전량을 수입에 의존하는 구조적인 문제를 내포하고 있다. 따라서 R&D 기술과 소요 산업기술을 직접적인 연계함으로써 산업기술의 수준을 강화하고, 수요자 중심의 제품개발을 공동으로 추진함으로써 TTM (Time-To-Market) 제품을 효과적으로 확보할 수 있는 국가주도의 종합적인 활성화 정책이 절실하다.

본 연구는 초고주파부품 산업 활성화를 위해 우선적으로 초고주파부품의 산업 수요 지향적 실용화 기술개발 체계 구성하고 기존의 연구사업을 통해 확보한 화합물반도체 기반의 연구결과물을 수요자 요구 규격에 맞도록 재가공하거나 고도화할 수 있는 상용화 지원체계를 구축하며 MPW 정기 shuttle 운영을 통한 지속적 제품을 개발한다. 중소기업 위주의 화합물반도체 기반의 초고주파 부품산업 활성화를 위하여 범국가적 산학연 협력 체계를 구축하고 산업체를 지원함으로써 국내 초고주파 부품산업의 경쟁력 강화를 통한 산업 전후방효과를 극대화한다. 또한 화합물반도체 기반의 초고주파부품 산업화 허브를 통한 중소기업 간의 정보교류를 활성화하고 시험/인증센터와 연계지원으로 마케팅을 지원하고 국내 화합물반도체 기반의 양산 관련 기관 및 산업체와 연계를 추진한다.

III. 연구내용 및 범위

본 연구는 초고주파부품 산업 활성화를 위해 화합물반도체 기반의 초고주파부품 산업화 허브구축을 통한 중소기업 간의 정보교류를 활성화하고 초고주파부품의 산업 수요 지향적 상요부품 개발 체계를 구성하여 국내 초고주파 부품산업의 경쟁력 강화에 기여하기 위한 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

- 수요자 중심 초고주파부품 산업화 HUB 구축
- 화합물반도체 기반의 상용화 품목 발굴
- 1~10GHz 초고주파부품 library 고도화를 통한 시제품 개발
- Pilot Production 기술 개발
- 산업체의 신규 시스템 개발 시 필요한 prototype 적기 제공
- 신뢰성 인증기관과 공조를 통한 시제품 신뢰성 평가

IV. 연구결과

본 연구과제의 7차년도 주요 연구결과는 다음과 같다

1. 9GHz 대역 30W GaN 전력소자 개발

- 9GHz 대역 30W GaN 전력소자 제작
- 9GHz 대역 30W GaN 전력소자 측정
- 전량 수입에 의존하는 9GHz 대역 30W GaN 전력소자 국산화

2. K-대역 GaN HEMT 소자 개발

- K-대역 GaN HEMT 소자 설계 및 제작
- K-대역 GaN HEMT 소자 측정

V. 기대성과 및 건의

본 연구는 화합물반도체 기반의 초고주파부품 산업화 허브구축을 통한 산학연간의 정보교류를 활성화와 초고주파부품 산업의 경쟁력 강화에 기여하고 고부가가치 화합물반도체 기반의 설계 및 제품 생산 상용화 관련 일괄 기술 확보를 통해서 국책 연구소와 초고주파부품 산업체간 신속한 기술 교류를 통한 국내 초고주파부품 기술을 고도화하여 다양한 산업체 신규 시스템 개발시 필요한 시제품을 적기에 공급하여 **emerging market**을 선점한다. 또한, 화합물반도체 기반의 초고주파부품의 국내 수요를 전량 공급하여 수입대체를 이루고, 이를 통해 산업체가 자생하여 기술을 고도화할 수 있는 기반을 제공함으로써 수출을 통한 해외시장 점유하는 효과를 도모할 수 있다.

ABSTRACT

I . TITLE

Establishment of Basis for Compound Semiconductor Components
Technology Based on Industrial Demand

II . THE OBJECTIVES

Commercial compound semiconductor(CS) components are used for a variety of niche applications apart from Si applications at mostly small quantities. They are assembled by medium-to-small companies using imported CS devices and integrated circuits(ICs') due to the lack of domestic manufacturing basis for devices and ICs'. This current domestic situation calls this industry's attention for a comprehensive invigorating move that can improve technological level of industry by connecting R&D to industrialization and providing cooperation for demand-oriented product development. This move would provide the effective ways for the development of time-to-market products.

In this context, this study is aimed for the vitalization of high frequency components industry by providing the basis for the development and commercialization schemes that not only further develop R&D prototypes to commercially viable ones but also provide fabrication services of multi wafer project shuttles. This study would at the same time provoke country-wise industry-academia-research cooperation system to help medium-to-small enterprises in this industry establish the thrust for the market penetration. Also, this study is to provide a hub for the active environment in this industry for the exchange of information and manpower. This study would also assist industry's marketing activities by establishing the relationship with test/certification organizations and mass production facilities.

III. THE CONTENTS AND SCOPE OF THE STUDY

The contents and scope of this study is listed below:

- Establishment of the hub for the industrialization of demand-oriented high frequency components
- Pursuit for the prospective CS components for commercialization
- Prototyping of 1~10GHz components through library improvement
- Establishment of pilot production technology
- Delivery of the timely prototyping of industry demand
- Establishment of the reliability technology through the cooperation with related organizations

IV. RESULTS

The results of the seventh year of this study are listed below:

1. Development of 30W GaN HEMT at 9 GHz band

- Fabrication of 30W GaN HEMT at 9 GHz band
- Measurement of 30W GaN HEMT at 9 GHz band
- Domestic production of 30W GaN HEMT at 9 GHz band which are all imported

2. Development of GaN HEMT at K-band

- Design and Fabrication of GaN HEMT at K-band
- Measurement of GaN HEMT at K-band

V . EXPECTED RESULT & PROPOSITION

This study is to provide the basis for the cooperational environment in the CS components industry through the establishment of the industry-academia-research hub, and, thereby, contribute to the improvement of the competitiveness of CS components industry. The success of this study will establish the design-fabrication-package-test-and-marketing productive cycles within this industry, so that domestic companies can not only penetrate into already-present market, but also even take the optimistic position in the emerging market. Eventually, CS components demand will be self-supplied domestically and further result in the minimizing of import expenses and the maximizing of export profits.

CONTENTS

CHAPTER 1. Overview of the Research	3
SECTION 1 Need for the Research	3
SECTION 2 Objectives of the Research	4
 CHAPTER 2. Development of 30W GaN power HEMT at 9GHz	 5
SECTION 1 Fabrication of 30W GaN power HEMT at 9GHz	7
SECTION 2 Measurement of 30W GaN power HEMT at 9GHz	11
SECTION 3 Conclusion	18
 CHAPTER 3. Development of GaN HEMT at K-band.....	 20
SECTION 1 Fabrication of GaN power HEMT at K-band	22
SECTION 2 Measurement of GaN power HEMT at K-band	23
SECTION 3 Conclusion	34

CHAPTER 4. Conclusions	37
Abbreviations.....	39
List of Technical Documents	40

FIGURES

[Figure 2-1] Flowchart of AlGaIn/GaN HEMT process	7
[Figure 2-2] Cross section of fabricated AlGaIn/GaN HEMT on SiC	9
[Figure 2-3] TEM Photograph of AlGaIn/GaN HEMT T-gate.....	10
[Figure 2-4] Unit device with 2finger 200um gate width(XO200_100).....	10
[Figure 2-5] Uniformity of fabricated unit device(XO200_100).....	11
[Figure 2-6] Photograph of fabricated GaN HEMT	12
[Figure 2-7] DC measurement results of GaN HEMT with 6x100um gate width	13
[Figure 2-8] RF measurement results of GaN HEMT with 6x100um gate width	13
[Figure 2-9] Power measurement results of GaN HEMT with 6x100um gate width.....	13
[Figure 2-10] Flowchart of GaN power device PKG module development.....	14
[Figure 2-11] Drawing of GaN HEMT package	15
[Figure 2-12] Photographs of GaN HEMT device with AuSn eutectic die bonding process...	15
[Figure 2-13] Photographs of GaN HEMT device with 1mil wire bonding process.....	16
[Figure 2-14] Photographs of GaN HEMT device with cap sealing process	16
[Figure 2-15] Block diagram of 9GHz load-pull measurement system.....	17
[Figure 2-16] Measurement results of fabricated GaN power device PKG module.....	18
[Figure 3-1] Photograph of the ohmic electrode surface shape	22
[Figure 3-2] Device shape after 1st via metal formation	23
[Figure 3-3] Photograph of fabricated GaN HEMT device(gate width 10x100um).....	24
[Figure 3-4] DC measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 10x100um)	25
[Figure 3-5] Gm measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 10x100um)	26

[Figure 3-6] RF measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 10x100um)	26
[Figure 3-7] Power measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 10x100um)	27
[Figure 3-8] Photograph of fabricated GaN HEMT device(gate width 6x200um)	28
[Figure 3-9] DC measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 6x200um)	28
[Figure 3-10] Gm measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 6x200um)	29
[Figure 3-11] RF measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 6x200um)	30
[Figure 3-12] Power measurement results of fabricated GaN HEMT device(gate width 6x200um)	31
[Figure 3-13] Block diagram of 24.2GHz load-pull measurement system	32
[Figure 3-14] Photographs of fabricated heat-sink for power measurement at 24.2GHz	32
[Figure 3-15] Power measurement results of GaN HEMT device at 24.2GHz	33

목

차

제 1 장 서론	3
제 1 절 연구의 필요성	3
제 2 절 연구의 목적	4
제 2 장 9GHz 대역 30W GaN 전력 소자 개발	5
제 1 절 AlGaIn/GaN HEMT 소자 제작 공정	7
제 2 절 9GHz 대역 30W GaN 전력소자 측정	11
제 3 절 결론	18
제 3 장 K-대역 GaN HEMT 소자 개발	20
제 1 절 K-대역 AlGaIn/GaN HEMT 소자 제작 공정	22
제 2 절 K-대역 AlGaIn/GaN HEMT 소자 특성 측정	23
제 3 절 결론	34
제 4 장 결 론	37

약어표	39
기술문서 구성표	40

그림목차

[그림 2-1] AlGaIn/GaN HEMT on SiC 소자 제작 공정 순서도.....	7
[그림 2-2] 중요 공정 완료시의 AlGaIn/GaN HEMT on SiC 소자 단면 모식도.....	9
[그림 2-3] T-gate 단면 TEM 사진	10
[그림 2-4] 게이트 폭 200 μm 인 2-finger 기본 소자(X0200_100)	10
[그림 2-5] X0200_100 기본소자의 균일도	11
[그림 2-6] 제작된 GaN HEMT 전력소자 사진	12
[그림 2-7] 게이트 폭이 6 x 100 μm 인 GaN HEMT DC측정 결과	13
[그림 2-8] 게이트 폭이 6 x 100 μm 인 GaN HEMT RF 측정 결과.....	13
[그림 2-9] 게이트 폭이 6 x 100 μm 인 GaN HEMT Power 측정 결과.....	13
[그림 2-10] GaN 전력소자 패키지 모듈 개발 순서.....	14
[그림 2-11] GaN 전력소자 패키지 모듈 제작을 위한 도면.....	15
[그림 2-12] GaN 전력소자 AuSn eutectic die bonding 공정 사진	15
[그림 2-13] GaN 전력소자 1 mil wire bonding 공정 사진.....	16
[그림 2-14] GaN 전력소자 패키지 Cap sealing 공정 사진	16
[그림 2-15] 9GHz 대역 Load-Pull 측정 시스템 구성도.....	17
[그림 2-16] 제작된 GaN 전력소자 패키지 모듈 측정 결과.....	18
[그림 3-1] 오믹 열처리 후의 오믹 전극 표면 형상	22
[그림 3-2] 1차 연결 금속 형성 후 소자 형상.....	23
[그림 3-3] 제작된 게이트 폭이 10 $\times$ 100 μm 인 GaN HEMT 전력소자 사진.....	24
[그림 3-4] 제작된 게이트 폭이 10 $\times$ 100 μm 인 GaN HEMT I-V 측정 결과	25
[그림 3-5] 제작된 게이트 폭이 10 $\times$ 100 μm 인 GaN HEMT transconductance 측정 결과.....	26
[그림 3-6] 제작된 게이트 폭이 10 $\times$ 100 μm 인 GaN HEMT RF 측정 결과.....	26
[그림 3-7] 제작된 게이트 폭이 10 $\times$ 100 μm 인 GaN HEMT 전력 측정 결과.....	27

[그림 3-8] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력소자 사진.....	28
[그림 3-9] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT I-V 측정 결과.....	28
[그림 3-10] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT transconductance 측정 결과	29
[그림 3-11] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT RF 측정 결과.....	30
[그림 3-12] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력 측정 결과.....	31
[그림 3-13] 24.2GHz 전력특성 측정을 위한 로드풀 측정 시스템 구성도.....	32
[그림 3-14] 24.2GHz 전력특성 측정을 위한 방열판 제작(Eutectic bonding).....	32
[그림 3-15] 24.2GHz 전력특성 측정결과.....	33

제 1 장 서 론

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 필요성

유무선통신 시스템의 송신/수신을 위한 Front-End에는 고속/고주파 특성과 수광/발광 특성을 활용하는 화합물반도체 기반의 전자소자와 광소자가 필수적으로 사용되는데, 기술의 고난이도와 국가적 기술전략성 때문에 국내외적으로 수급이 용이하지 않은 품목이 많다. 소요 품목이 민수와 국방용으로 대부분 소량다품종이지만, 소자의 개발에서부터 집적회로 및 모듈화에 필요한 제작환경 구축에는 설계, 제작, 측정 등의 반도체 청정생산시설(Clean Room)과 고도화된 기술인력이 소요되는 초기투자가 막대한 특징을 가진다.

관련 국내 산업체는 주로 중소벤처기업으로서, 소요되는 초고주파부품을 전량 해외에서 수입에 의존하고 있어 수요자중심의 성능확보, 납기, 가격 등에서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. ETRI에서는 이미 15년 이상의 화합물반도체 관련 국책연구사업 수행을 통해 광/전자소자의 제작이 가능한 청정실험실과 장비를 구비하고 숙련된 전문인력의 경험을 바탕으로 다수의 우수한 화합물반도체 연구시제품을 보유하고 있다.

따라서 기확보된 화합물반도체 기본 기술들을 안정적 정부재원을 바탕으로 효율적으로 활용하여, 산업체의 소량다품종 초고주파 부품의 수요에 부응하는 상용화 연구가 필요하다. 본 사업을 통해 화합물반도체 기반의 초고주파 부품산업의 허브를 구축하고 전주기적 연구수행 체계를 구축함으로써 국내 초고주파부품 산업의 활성화를 통한 국제적 경쟁력 강화가 시급하기 때문에 연구가 필요하다.

제 2 절 연구의 목적

유무선 통신시스템의 발전과 더불어 시스템의 송신/수신을 위한 Front-End에는 고속/고주파 특성과 수광/발광 특성을 활용하는 화합물반도체 기반의 전자소자와 광소자가 필수적으로 사용되는데, 기술의 고난이도와 국가적 기술전략성 때문에 국내외적으로 수급이 용이하지 않은 품목이 많다.

화합물반도체 기반의 초고주파부품은 그 특성상, 소량 다품종의 전형적인 중소기업 생산 형태를 취하고 있으나, 우리나라 초고주파 부품기업의 영세성과 낮은 기술 수준 등으로 국내 초고주파부품 분야의 경쟁력이 극히 취약, 전량을 수입에 의존하는 구조적인 문제를 안고 있다. 따라서 R&D 기술과 소요 산업기술을 직접적인 연계함으로써 산업기술의 수준을 강화하고, 수요자 중심의 제품개발을 공동으로 추진함으로써 TTM (Time-To-Market) 제품을 효과적으로 확보 할수 있는 ETRI에서는 4인치 Pilot 생산기반을 구축하여 준양산이 가능한 환경에서 자체 설계, 제작 및 테스트를 수행하여 왔으며 향후 수요자 중심의 부품 공급을 위한 산업체와의 허브 구축을 통한 화합물반도체 부품 생산 및 공급을 위한 전주기적인 체계를 구축하고자 한다.

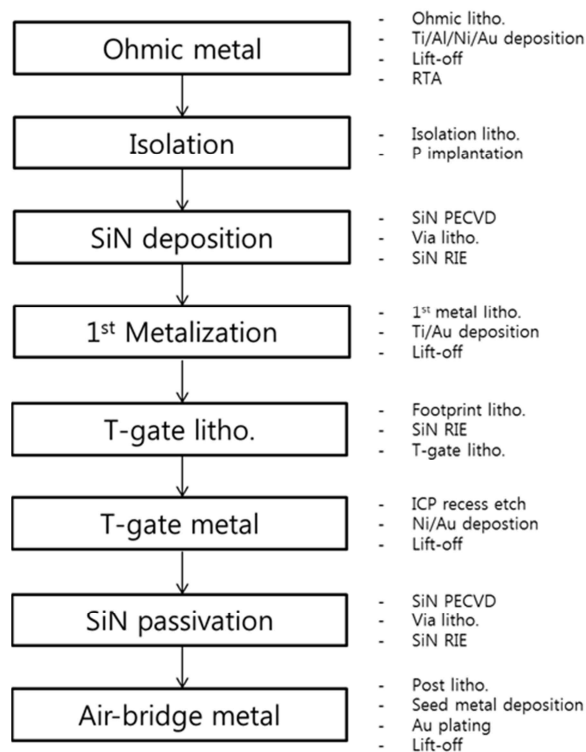
특히 중소기업 위주의 화합물반도체 기반의 초고주파 부품산업 활성화를 위하여 범국가적 산학연 협력 체계를 구축하고 산업체를 지원함으로써 국내 초고주파 부품산업의 경쟁력 강화를 통한 산업 전후방효과를 극대화함과 동시에 화합물반도체 기반의 초고주파부품 산업화 허브를 통한 중소기업 간의 정보교류를 활성화하고 시험/인증센터와 연계지원으로 마케팅을 지원하고자 한다. 뿐만 아니라 국내 화합물반도체 기반의 양산 관련 기관 및 산업체와 연계를 추진 국내 화합물반도체 기반의 초고속/초고주파 설계/제작/측정/평가의 일괄 지원 시스템을 구축하여 향후 우리나라 화합물반도체 관련산업의 혁신적이고 독창적인 중흥을 유도하고자 한다.

제 2 장 9GHz 대역 30W GaN 전력 소자 개발

제 2 장 9GHz 대역 30W GaN 전력 소자 개발

제 1 절 AlGaIn/GaN HEMT 소자 제작 공정

본 연구에서 개발한 9GHz 대역 GaN 전력소자의 제작공정 순서는 [그림 2-1]와 같다. 전력소자 제작공정에서 소스와 드레인의 오믹전극 패턴은 I-line stepper를 사용한 image reversal lithography 공정으로 진행하였다. E-beam evaporation을 사용하여 오믹 메탈(Ti/Al/Ni/Au)를 증착한 후 리프트-오프 방법으로 전극을 형성하였다. RTA(Rapid Temperature Annealing) 장비로 열처리하여 기판과 오믹 접촉 특성을 갖도록 하였다.



[그림 2-1] AlGaIn/GaN HEMT on SiC 소자 제작 공정 순서도

소자격리(device isolation)공정은 AlGaIn/GaN HEMT 소자 사이를 전기적으로 분리하기 위한 공정으로 습식식각 방법과 건식식각 방법 그리고 이온주입(ion implantation)형 소자격리 방법이 있다. 본 연구에서는 기존의 건식식각 방법의 격리공정에서 발생하는 누설전류 문제를 해결하기 위하여 이온주입형 소자격리 공정을 개발하여 소자제작에 적용하였다. 이온주입형 격리공정 조건으로 phosphorus 이온을 사용하여 가속 전압은 60KeV와 80KeV의 다중이온주입 방법으로, 이온도즈(ion dose)는 $4 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 이 사용되었다. 소자격리 공정이 끝난 후에 SiN를 증착하고 오믹전극과 전극패드 영역을 오픈하기 위하여 비아 리소그래피 공정을 진행하였고 RIE(Reactive Ion Etching) 방법으로 SiN 막을 건식식각하여 제거하였다. 소자영역에 형성된 소스와 드레인 오믹전극과 소자격리영역에 형성될 전극패드 간의 전기적 연결을 위해 1차 연결금속을 형성하였다. 역경사를 갖는 포토레지스트 패턴을 스테퍼를 이용하여 노광/현상하고 Ti/Au의 금속을 증착하였다. 리프트-오프 방법으로 1차 연결금속을 제외한 메탈을 제거하여 오믹전극과 전극패드가 연결된다.

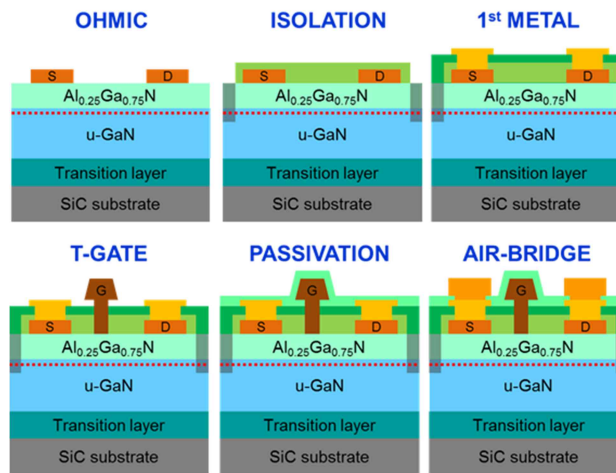
9GHz 대역에서 충분한 이득을 갖는 소자를 제작하기 위해서는 게이트 전극의 길이가 $2.5\mu\text{m}$ 이하가 바람직하다. 본 연구에서는 전자빔 리소그래피 장비를 사용하여 $0.25\mu\text{m}$ 선폭을 갖는 패턴을 형성하였다. 게이트 전극의 단면 형상은 꺾은 헤드보다 헤드가 큰 T 자 형태로 일반적으로 T-gate 라는 명칭을 갖는다. 이와 같은 T-gate 형상과 원활한 리프트-오프 공정을 위하여 3층의 포토레지스트 층을 도포하고 전자빔의 도즈를 조절하여 노광/현상하였다.

AlGaIn/GaN HEMT 소자의 게이트 리세스 공정에 의해 소자의 문턱전압 및 핀치오프 전압을 제어하고 누설전류 감소에 의해 높은 항복전압 특성을 얻을 수 있다. 그러나 AlGaIn/GaN HEMT 소자는 화학적으로 안정하기 때문에 습식 식각방법 보다는 건식 식각방법을 사용하여 게이트 리세스를 진행해야 한다. 건식 식각 시 높은 DC 바이어스는 기판 표면에 손상을 주게 되는 원인으로 작용하기 때문에 낮은 DC 바이어스로 식각이 가능한 ICP(Inductively Coupled Plasma) 식각방법을

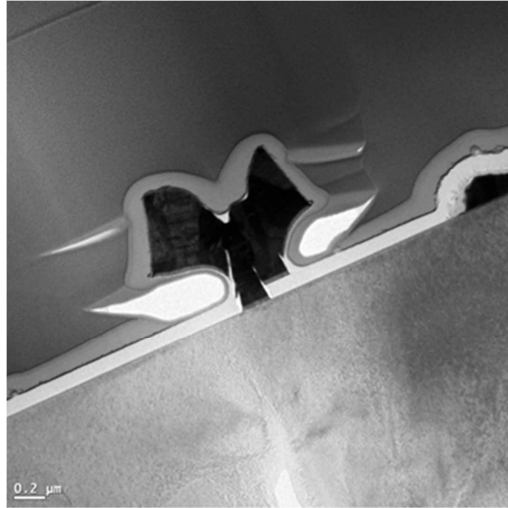
적용하였다. BC13/C12가스를 사용한 ICP 방식의 건식식각 공정을 사용하여 AlGaIn/GaN HEMT 전력소자의 게이트 리세스 공정을 개발하였으며, 게이트 리세스는 ICP power 250W, table power 10W, BC13/C12 가스 3/18sccm, 압력 5mTorr, He 10mTorr 공정 조건으로 진행하였다. T-gate 전극은 Ni/Au를 순차적으로 증착한 후 리프트-오프 방법에 의해 형성하였다.

마지막으로 전면에 SiN을 증착하여 T-gate를 포함한 전극을 패시베이션 처리하였다. 전극 패드와 1차 연결금속의 두께를 늘리고 한 개의 칩 내에서 여러 소스전극 간의 전기적 연결을 위해 에어-브릿지 메탈 공정을 수행하였다. 1차 금속위에 도금이 될 영역을 오픈하도록 포토레지스트 공정을 한 후 seed metal을 증착하였다. 이 위에 다시 두꺼운 포토레지스트를 도포하고 실제 도금될 영역만 오픈하는 리소그래피 공정을 거친다. $3.4\mu\text{m}$ 두께로 Au 도금을 한 후 아세톤 스프레이에 의해 얇은 seed metal은 제거되어 에어-브릿지 공정을 마치게 된다.

[그림 2-2]는 상기에 설명한 공정에 의해 구현되는 중요한 단계에서 소자의 단면을 도시한 것이다. [그림 2-3]은 T-gate 형성 후 단면 형상을 투과전자현미경으로 관찰한 사진이다. GaN 에피층과 접촉해 있는 게이트 폭의 길이는 $0.18\mu\text{m}$ 임을 확인할 수 있다.

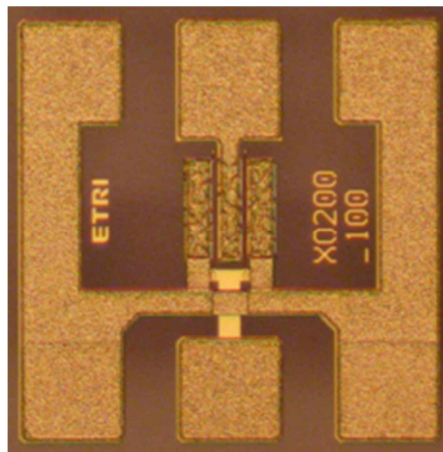


[그림 2-2] 중요 공정 완료시의 AlGaIn/GaN HEMT on SiC 소자 단면 모식도

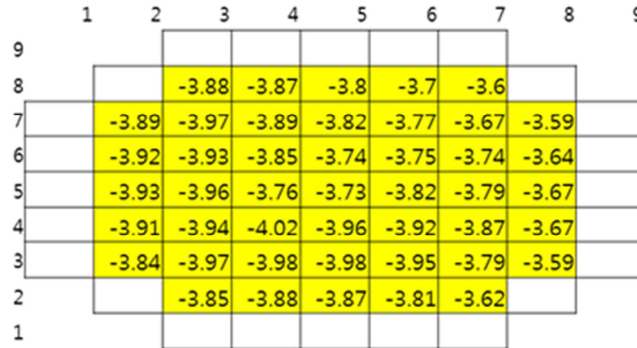


[그림 2-3] T-gate 단면 TEM 사진

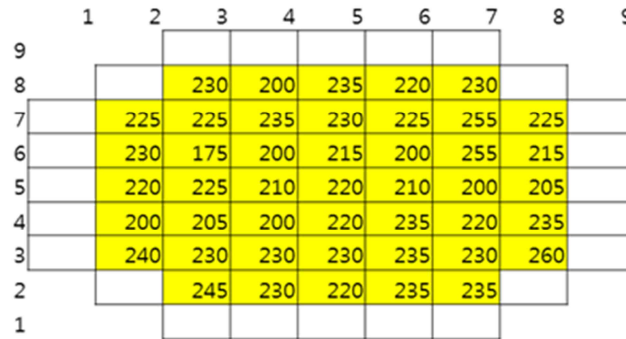
45개 유효필드에서 단위 소자인 X0200_100 [그림 2-4]의 V_{th} 와 $G_m(max)$ 를 측정하여 평균과 표준편차를 구하였다. [그림 2-5] 평균 V_{th} 는 $-3.82V$ 였으며 $\pm 3.15\%$ 의 편차를 가졌다. 평균 $G_m(max)$ 는 $223mS/mm$ 였으며 $\pm 7.57\%$ 의 표준편차를 나타내어 균일한 특성을 나타내었다.



[그림 2-4] 게이트 폭 $200\mu m$ 인 2-finger 기본 소자(X0200_100)



(a) threshold voltage



(b) maximum transconductance

[그림 2-5] X0200_100 기본소자의 균일도

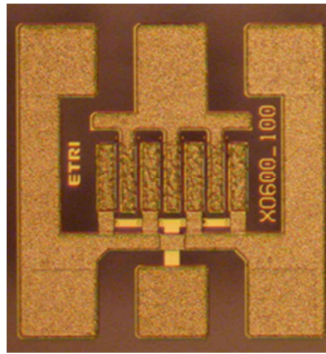
제 2 절 9GHz 대역 30W GaN 전력소자 측정

X-band GaN HEMT 소자의 DC, RF, Power 특성을 측정하였다. 소자는 먼저 on-wafer 상태에서 기본 테스트 소자를 측정 하였으며 이후 게이트 길이가 긴 소자는 패키지를 한 후에 측정 하였다. 전체 게이트 폭을 달리하는 여러 소자 가운데 대표적인 소자로 전체 게이트 폭이 $6 \times 100 \mu\text{m}$ 인 소자의 특성을 나타내었다.

1. GaN HEMT ($W_g=6 \times 100 \mu\text{m}$) 측정 결과

아래 [그림 2-6]는 게이트 폭이 $6 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 사진이다. 그림에서 알

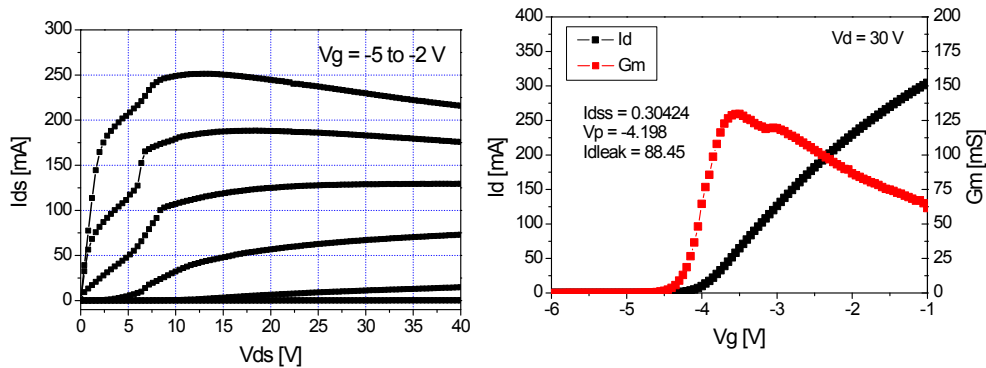
수 있는 바와 같이 게이트 6 개, 게이트 길이 $0.25\ \mu\text{m}$, 단위 게이트 폭 $100\ \mu\text{m}$ 를 갖는 기본 소자이다.



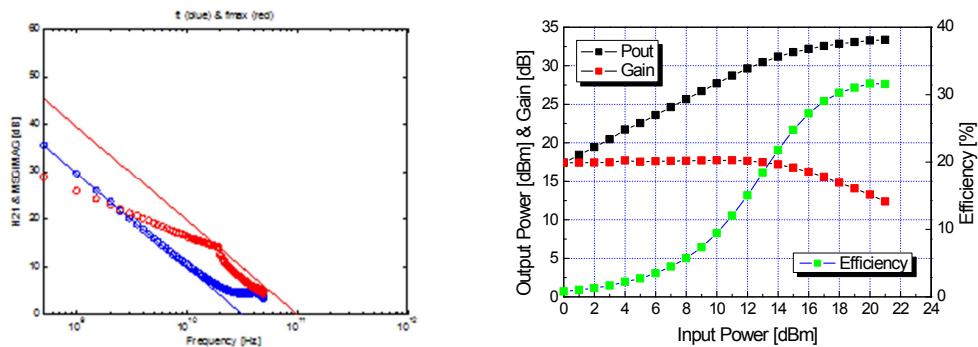
[그림 2-6] 제작된 GaN HEMT 전력소자 사진

DC 측정은 I-V 측정과 transconductance 측정을 수행하였다. 일정 한 드레인 전압 범위에서 게이트 전압을 변화시켰을 때의 드레인 전류값 변화를 살펴는 I-V 측정과 일정한 드레인 전압에서 게이트 전압을 변화시켰을 때의 드레인 전류와 트랜스 컨덕턴스 변화를 측정하는 트랜스 컨덕턴스 측정 2 가지를 수행하였다. I-V 측정조건은 $V_{ds} = 0\sim 40\text{ V}$, $V_{gs} = -5\sim -2\text{ V}$ (0.5 V step)이고, G_m 은 $V_{ds} = 30\text{ V}$ 에서 $V_{gs} = -6\sim -1\text{ V}$ 이다. [그림 2-7]은 제작된 게이트 폭이 $6\times 100\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 의 I-V 측정 결과이며, [그림 2-7]은 게이트 폭(W_g)이 $600\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자의 트랜스 컨덕턴스 (G_m)을 측정한 그래프이다. 전체 게이트 폭이 $600\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자는 $V_{ds} = 30\text{ V}$ 에서 $I_{dss} = 304\text{ mA}$ 이며 우수한 핀치오프 특성을 나타내었다. 트랜스 컨덕턴스 그래프로부터 최대 트랜스 컨덕턴스는 216 mS/mm 이다. 소자가 동작하는 임계전압은 -4.2 V 이며 핀치오프 상태에서의 게이트 전압이 -6 V 일 때의 누설전류는 $88.45\ \mu\text{A}$ 이다. RF 특성을 측정하기 위한 측정조건은 주파수 $500\text{ MHz}\sim 50\text{ GHz}$ 에서 드레인 전압 $V_d = 30\text{ V}$, 게이트 전압 -2 V 이고 이 조건에서 측정한 S-parameter 를 H21 과 MSG(maxim μm Stable Gain), MAG(Maxim μm Available Gain)을 이용하여 [그림 2-8]과 같이 차단주파수(cutoff Frequency, f_t),

최대발진주파수(Maxim μm Oscillation Frequency, f_{max})를 추출하였다. 게이트 폭이 $600\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자는 $V_{\text{ds}} = 30\ \text{V}$, $V_{\text{gs}} = -2\ \text{V}$ 에서 $f_t = 31.79\ \text{GHz}$, $f_{\text{max}} = 100.46\ \text{GHz}$ 이다. 드레인 전압 $30\ \text{V}$, 게이트 전압 $-2\ \text{V}$, 주파수 $9.3\ \text{GHz}$ 에서 총 게이트 길이 $600\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력소자의 전력측정 결과는 [그림 2-9]과 같다. $P_{1\text{dB}} = 31.75\ \text{dBm}$ 이었으며 포화전력(P_{sat})은 $33.36\ \text{dBm}$ (2.17W) 였다. 따라서 최대전력밀도는 $3.61\text{W}/\text{mm}$ 의 특성을 보였다. 이때, 전력이득 $P_{\text{gain}} = 17.4\ \text{dB}$ 였고 전력부가효율 $\text{PAE} = 31.56\%$ 값을 나타내었다.



[그림 2-7] 게이트 폭이 $6 \times 100\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT DC측정 결과

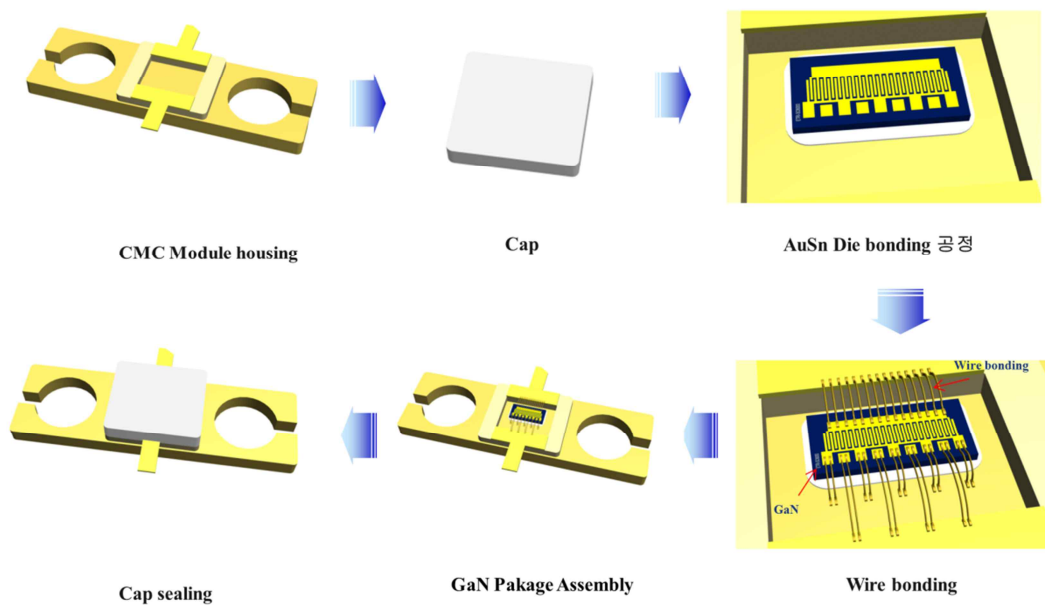


[그림 2-8] 게이트 폭이 $6 \times 100\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT RF 측정 결과

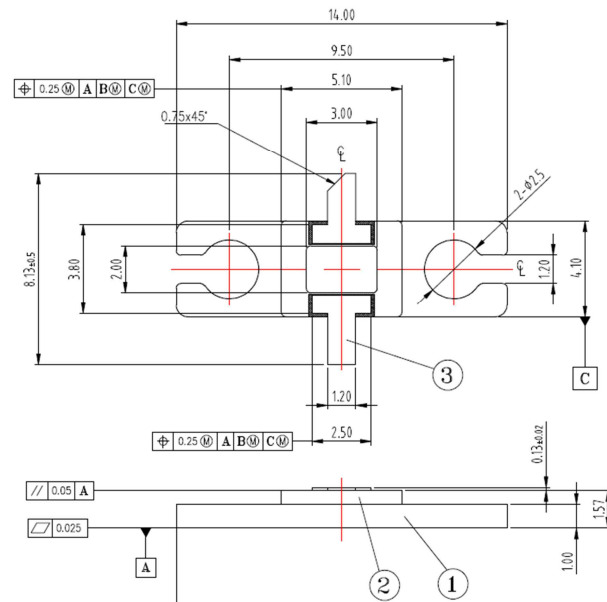
[그림 2-9] 게이트 폭이 $6 \times 100\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT Power 측정 결과

2. 9GHz 대역 30W 급 GaN HEMT Power 측정 결과

30W 급 전력소자를 패키지 하기 위한 패키지 모듈 개발 순서는 [그림 2-10]과 같고, [그림 2-11]과 같은 도면을 바탕으로 패키지를 제작하였다. 패키지 몸체는 코스텍시스에서 제작하였으며, 제작된 패키지 크기는 리드 프레임까지 포함하여 $8.13\text{ mm} \times 14.00\text{ mm} \times 1.57\text{ mm}$ 이며, Tolerance 는 $\pm 0.05\text{ mm}$ 이다. 패키지 몸체는 Cu50W50 으로 제작하였고 Ni $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 이상과 Au $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 이상의 두께로 도금하였으며, 리드 프레임은 Ni/Cr/Fe/Co 합금으로 이뤄진 Kovar 라는 재질로 제작하였고, 리드 당김 강도(Lead Pull Strength)는 90 도 방향에서 0.9 Kgf 이상이 되도록 제작하였다.

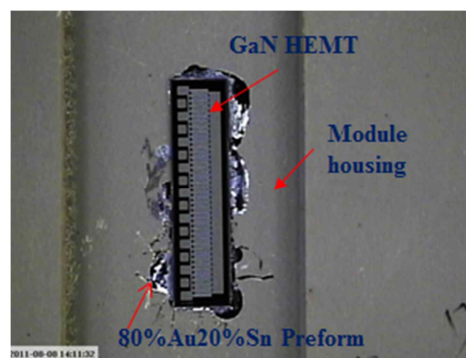


[그림 2-10] GaN 전력소자 패키지 모듈 개발 순서

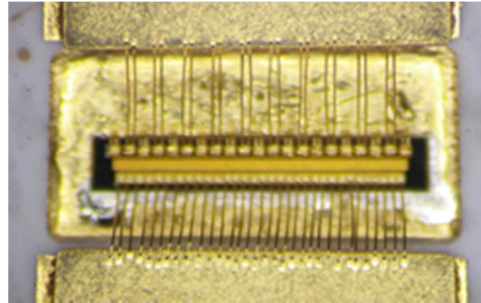


[그림 2-11] GaN 전력소자 패키지 모듈 제작을 위한 도면

제작된 GaN 전력소자에 80%Au20%Sn preform 을 이용하여 eutectic die bonding 공정으로 metal housing 에 칩을 [그림 2-12]와 같이 부착하였으며, [그림 2-13]과 같이 1 mil wire bonding 공정을 활용하여 제작된 GaN 전력소자를 패키지의 입력단 연결, 출력단 연결 그리고 접지를 위하여 공정을 수행하였다.

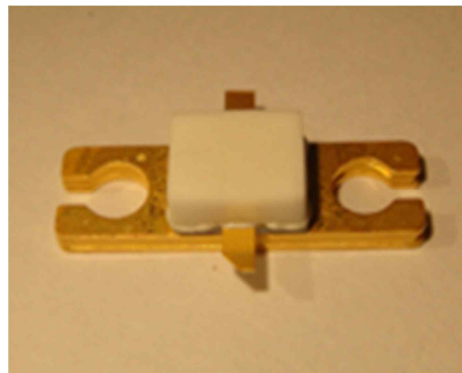


[그림 2-12] GaN 전력소자 AuSn eutectic die bonding 공정 사진



[그림 2-13] GaN 전력소자 1 mil wire bonding 공정 사진

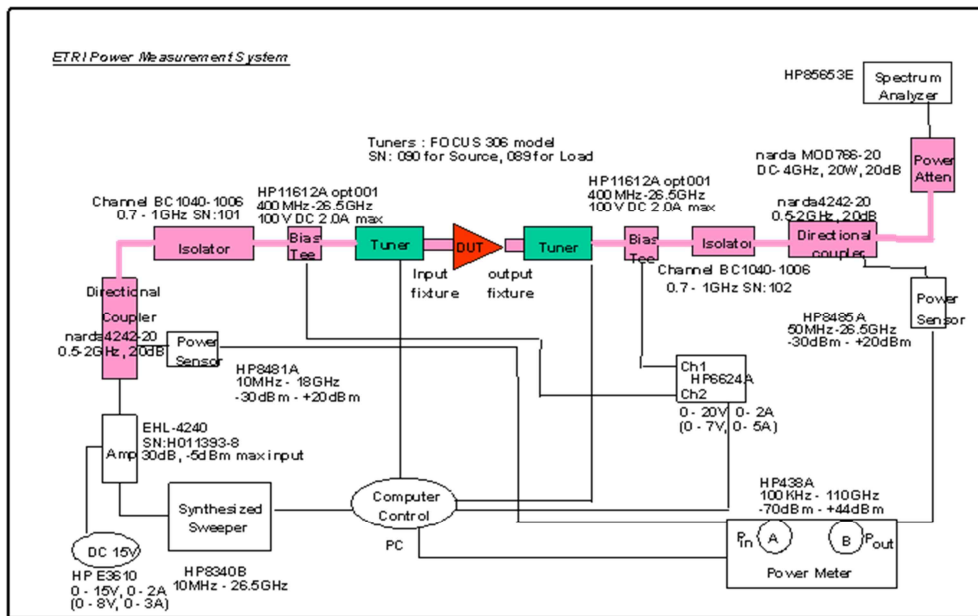
패키지 제작된 칩의 보호를 위하여 세라믹 cap 을 활용하여 패키지 상단부를 [그림 2-14]와 같이 sealing 공정 처리하였다.



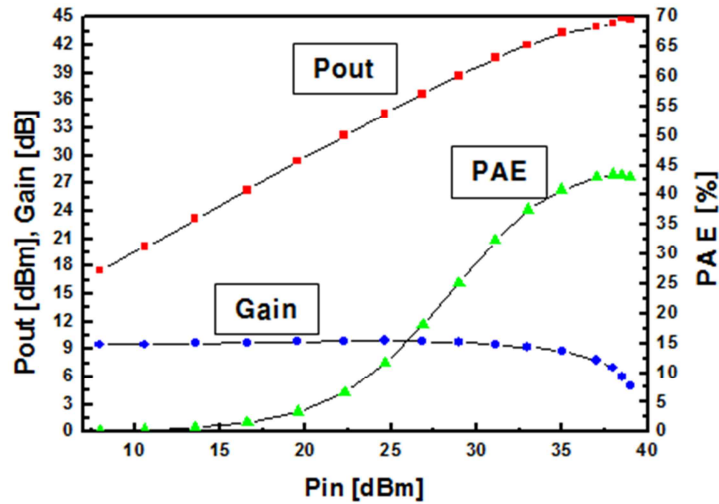
[그림 2-14] GaN 전력소자 패키지 Cap sealing 공정 사진

패키지 제작을 위하여 GaN 전력소자 시료들에 대해 게이트 전압을 문턱전압 이하의 충분히 낮은 전압을 인가하고 드레인 전류가 1 mA/mm 가 흐를 때까지 드레인 전압을 증가시켜 항복전압을 측정하여 패키지 제작 후 동작 전압인 30 V 의 3 배인 100 V 이상이 되는 GaN 전력소자를 선별하였다. GaN 전력소자를 실장하여 제작된 패키지의 출력전력특성을 측정 평가하기 위하여 [그림 2-15]와 같이 로드풀 (Load-Pull) 측정 시스템을 구성하였다. 로드풀 장비는 Maury 사의 튜너인 MT982BU01(0.8~18GHz)를 사용하였고, Bias T는 Auriga 사의 AU0699-0012(2~8GHz)를 사용하였으며, Coupler, Combiner 와 드라이브 앰프는 Cernex 사의 제품을 사용하였

다. 그외에도 Attenuator, Signal generator, Power meter, DC power supply, Spectrum analyzer 등을 사용하여 측정하였다. [그림 1-16]은 패키지 제작한 GaN 전력소자의 전력특성을 얻기 위하여 Maury 사의 로드풀 시스템을 이용하여 주파수 9.3 GHz 에서 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. GaN 전력소자는 드레인 동작 전압(V_d)을 30 V 인가하였고 게이트 전압(V_g)을 -3 V 인가하여 정동작 드레인 전류 (I_{dq})가 2.4~2.5 A 가 흘렀으며 게이트 누설전류($I_{g,leak}$)가 0~2 mA 가 흘렀다. [그림 2-16]에서 보는 바와 같이 GaN 전력소자의 포화출력전력($P_{out,sat}$)은 44.8 dBm 으로 30 W 이며 전력이득은 9 dB 이고 전력변환효율(PAE)는 43%을 나타내었다.



[그림 2-15] 9GHz 대역 Load-Pull 측정 시스템 구성도



[그림 2-16] 제작된 GaN 전력소자 패키지 모듈 측정 결과

제 3 절 결론

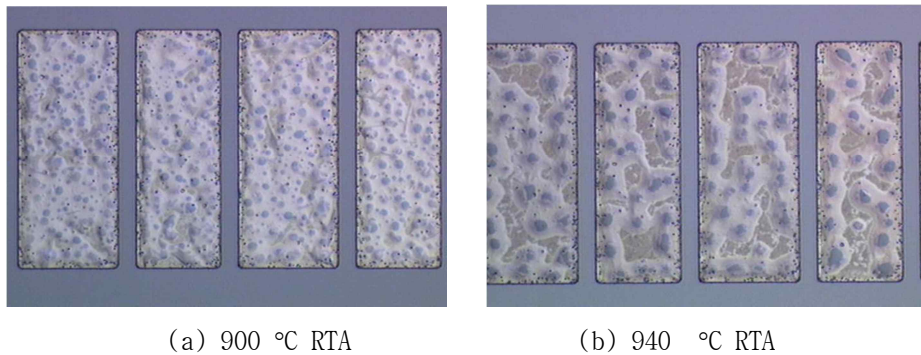
ETRI 가 보유하고 있는 HEMT 기술을 활용하여 GaN 기반의 HEMT 전력소자를 제작하였으며 그 특성을 살펴보았다. 제작한 X-밴드 GaN HEMT 전력소자(XO10000, $L_g=0.25\ \mu\text{m}$, $W_g=10\ \text{mm}$)를 패키지하여 로드풀 시스템을 통해 전력특성을 측정하였으며, 게이트 길이가 $0.25\ \mu\text{m}$ 이고 게이트 폭이 $10\ \text{mm}$ 인 GaN HEMT 전력소자(XO10000)는 $9\ \text{GHz}$ 에서 $30\ \text{W}$ 의 출력전력을 얻었다. 측정결과를 통해 살펴본 바와 같이 GaN HEMT 전력소자(XO10000)의 게이트 누설전류 특성을 개선하여 항복전압과 출력전력을 향상시키는 것이 필요하며, 원활한 방열과 효과적인 접지를 위해 후면 비어홀 공정을 적용하는 것이 요구된다. 또한 패키지에 의한 출력전력 및 전력이득 손실을 줄이기 위하여 본딩 와이어의 길이가 가능한 짧도록 패키지 구조 변경도 필요하다. 아울러 패키징한 GaN HEMT 전력소자(XO10000)의 성능 균일도 향상을 위해 소자의 수율도 더욱 개선되어야 할 것이다.

제 3 장 K-대역 GaN HEMT 소자 개발

제 3 장 K-대역 GaN HEMT 소자 개발

제 1 절 K-대역 AlGaIn/GaN HEMT 소자 제작 공정

화합물실험실의 electron-beam thermal evaporator 를 사용하여 Ti/Al/Ni/Au 를 증착하였다. 이때 Ni 두께를 보정한 후 증착하였다. 증착 두께는 각 층이 300Å/1000Å/300Å/1000Å 이 되도록 하였다. 오믹 열처리는 900 °C, 30sec RTA 후 940 °C, 30sec 간 추가 RTA 하였다. [그림 3-1]은 900 °C RTA 후와 940 °C RTA 후의 오믹 전극의 광학 현미경 사진이다.



[그림 3-1] 오믹 열처리 후의 오믹 전극 표면 형상

1 차 연결 금속 공정 완료 후 TLM 패턴에서 측정한 면저항과 접촉저항 값은 각각 406 ohm/sq 와 9.35x10⁻⁶ohm.cm² 의 값을 나타내었다. 인(P)의 이온주입에 의해 소자 분리 공정을 수행하였는데, 본 공정에서는 포토레지스트와 더불어 SiN 막을 함께 이온주입의 마스크로 사용하였다. 즉 SiN 500Å 을 전면에 PECVD 를 이용하여 증착한 후 PFI38A 를 사용하여 패터닝한 후 BOE6:1 로 SiN 를 식각하였다. 노출된 액티브 이외의 영역에 이온 주입이 되어 기판의 전도성을 잃도록 하였다. 포토레지스트의 제거는 O₂ plasma ashing 에 의해서 제거하고 DI rinse 하였다. Isolation 공정 후 다시 SiN 를 300Å 증착하였다. PR 패터닝 후 RIE 장비를 사용하여 비아를

식각하였다. [그림 3-2]는 건식 식각에 의해 오픈 된 비아 위에 1차 연결금속을 형성했을 때의 소자 모습이다.



[그림 3-2] 1차 연결 금속 형성 후 소자 형상

전자빔 리소그래피 공정에 의해 SiN 층에 그려진 게이트 패턴의 선폭은 $0.17\sim 0.182\ \mu\text{m}$ 이었다. 3층 PMMA 구조의 포토레지스트에 전자빔 리소그래피 공정에 의해 형성된 gate stem의 폭은 $0.29\ \mu\text{m}$ 였으며 게이트 헤드의 폭은 $1\ \mu\text{m}$ 였다. 게이트 전극을 증착하기 전 gate recess 를 위한 ICP etch 는 BC13/C12 가스를 사용하고 RF power 3W 로 15" 간 수행하였다. Air-bridge 전극 공정 시 seed metal 의 증착은 Ti/Ni/Au=20/85/8Å 으로 하였으며 AZ4330 PR 을 사용하여 도금하고자 하는 영역을 오픈하였다. 도금 두께는 $3.2\ \mu\text{m}$ 로 하였다.

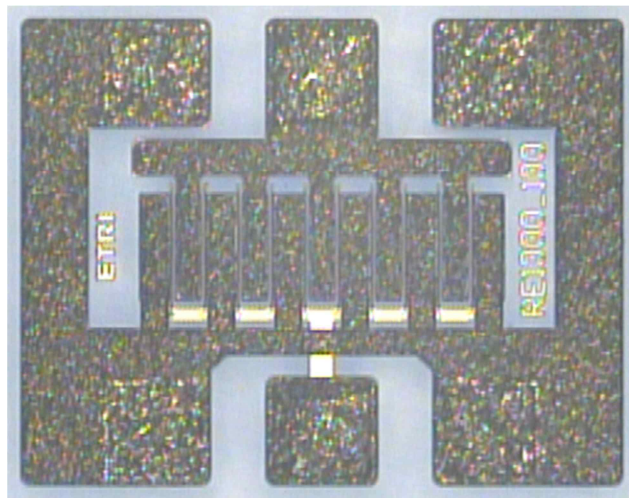
제 2 절 K-대역 AlGaIn/GaN HEMT 소자 특성 측정

K-band GaN HEMT 소자의 DC, RF, Power 특성을 측정하였다. 소자는 먼저 on-wafer 상태에서 기본 테스트 소자의 DC/RF 를 측정하였고, K-band 대역인 16GHz 와 24GHz

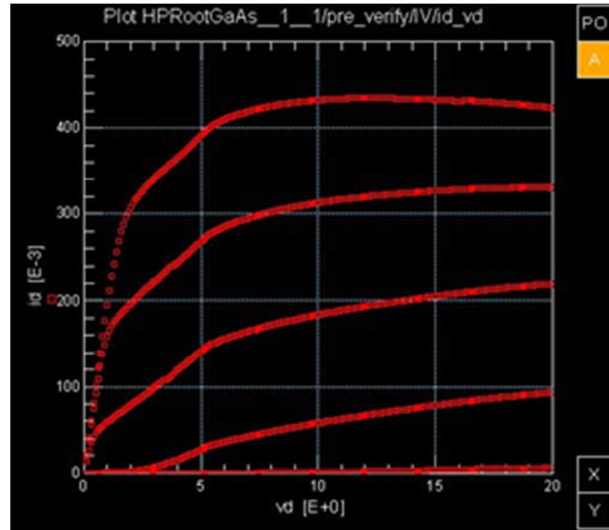
에서 Power 를 측정하였다. 기본소자는 $2 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자이고 실제 사용하게 될 소자는 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자이다. 실제 필요한 출력전력은 3~5 W 정도의 전력이 필요한데 측정한 소자는 출력전력밀도가 4W 로 소자의 사이즈는 1 mm 정도가 필요하므로 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자와 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 를 측정하였다.

2.1 GaN HEMT ($W_g = 10 \times 100 \mu\text{m}$) 측정 결과

아래 [그림 3-3]은 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 사진이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 게이트 10 개, 게이트 길이 $0.25 \mu\text{m}$, 단위 게이트 폭 $100 \mu\text{m}$ 를 갖고 총 게이트 폭은 1 mm 이다.

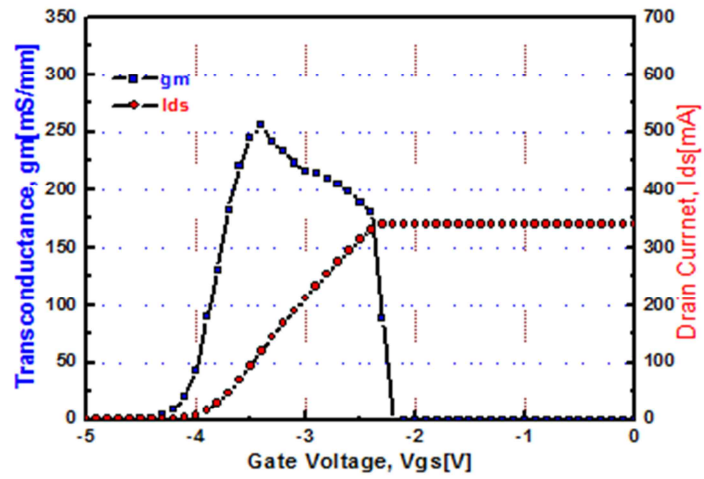


[그림 3-3] 제작된 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력소자 사진

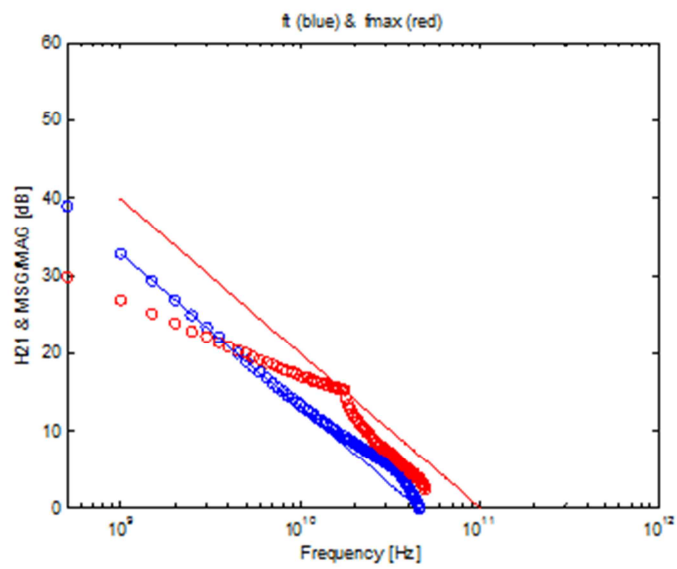


[그림 3-4] 제작된 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT I-V 측정 결과

DC 측정은 I-V 측정과 transconductance(G_m) 측정을 수행하였다. 일정한 드레인 전압 범위에서 게이트 전압을 변화시켰을 때의 드레인 전류값 변화를 살펴는 I-V 측정과 일정한 드레인 전압에서 게이트 전압을 변화시켰을 때의 드레인 전류와 트랜스 컨덕턴스 변화를 측정하는 트랜스 컨덕턴스 측정 2 가지를 수행하였다. I-V 측정조건은 $V_{ds} = 0 \sim 20 \text{ V}$, $V_{gs} = -5 \sim -2 \text{ V}$ (0.5 V step)이고, G_m 은 $V_{ds} = 25 \text{ V}$ 에서 $V_{gs} = -5 \sim 0 \text{ V}$ 이다. [그림 3-4]는 제작된 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT의 I-V 측정 결과이며, [그림 3-5]는 총 게이트 폭(W_g)이 $1000 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자의 트랜스 컨덕턴스 (G_m)을 측정한 그래프이다. 전체 게이트 폭이 $1000 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자는 $V_{ds} = 25 \text{ V}$ 에서 $I_{dss} > 340 \text{ mA}$ 이며 우수한 핀치오프 특성을 나타내었다. 실제 측정시의 드레인 전류의 한계 때문에 V_g 가 0 V 까지 측정하지 못했다. 트랜스 컨덕턴스 그래프로부터 최대 트랜스 컨덕턴스는 256 mS/mm 이다. 소자가 동작하는 임계전압은 -4.3 V 이며 핀치오프 상태에서의 게이트 전압이 -6 V 일 때의 누설전류는 $90 \mu\text{A}$ 이다.

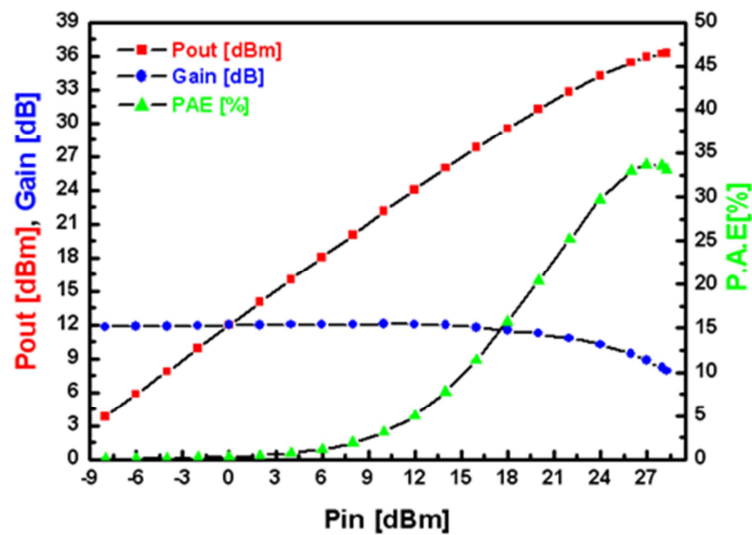


[그림 3-5] 제작된 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT transconductance 측정 결과



[그림 3-6] 제작된 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT RF 측정 결과

RF 특성을 측정하기 위한 측정조건은 주파수 500 MHz~50 GHz 에서 드레인 전압 $V_d = 25$ V, 게이트 전압 -3.2 V 이고 이 조건에서 측정한 S-parameter 를 H21 과 MSG(maxim μm Stable Gain), MAG(Maxim μm Available Gain)을 이용하여 [그림 3-6] 과 같이 차단주파수(cutoff Frequency, f_t), 최대발진주파수(Maxim μm Oscillation Frequency, f_{max})를 추출하였다. 게이트 폭이 $1000 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자는 $V_{ds} = 25$ V, $V_{gs} = -3.0$ V 에서 $f_t = 45.25$ GHz, $f_{\text{max}} = 101.57$ GHz 이다.



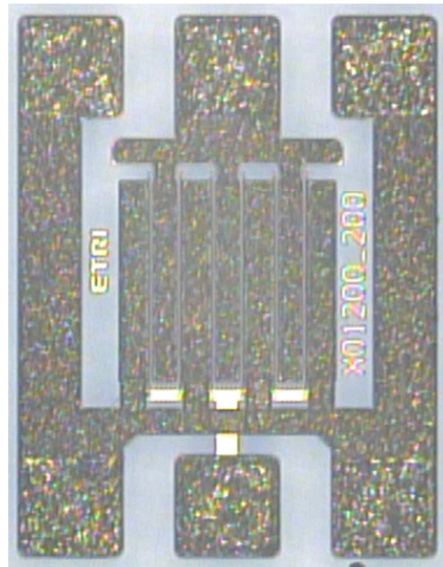
[그림 3-7] 제작된 게이트 폭이 $10 \times 100 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력 측정 결과

드레인 전압 30 V, 게이트 전압 -3.0 V, 주파수 16 GHz 에서 총 게이트 길이 $1000 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력소자의 전력측정 결과는 [그림 3-7]과 같다. $P_{1\text{dB}} = 32.1$ dBm 이었으며 포화전력(P_{sat})은 36.24 dBm (4.2W) 였다. 따라서 최대전력밀도는 4.2 W/mm 의 특성을 보였다. 이때, 전력이득 $P_{\text{gain}} = 12.0$ dB 였고 전력부가효율 $\text{PAE} = 33.7 \%$ 값을 나타내었다.

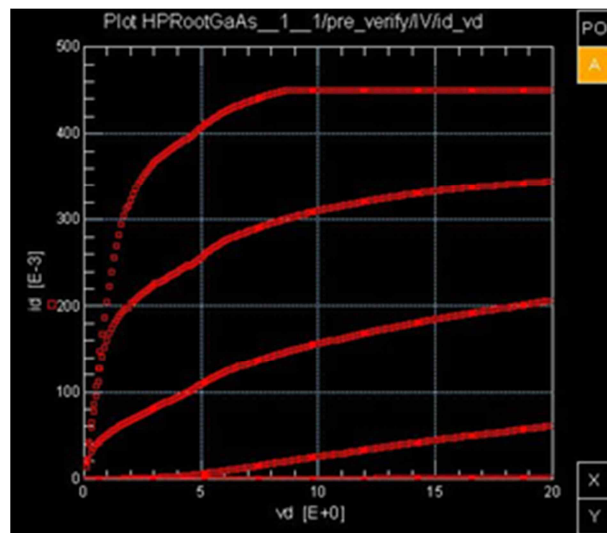
2.2 GaN HEMT ($W_g = 6 \times 200 \mu\text{m}$) 측정 결과

아래 [그림 3-8]은 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 사진이다. 그림에서 알

수 있는 바와 같이 게이트 6 개, 게이트 길이 $0.25\ \mu\text{m}$, 단위 게이트 폭 $200\ \mu\text{m}$ 를 갖고 총 게이트 폭은 $1\ \text{mm}$ 이다.

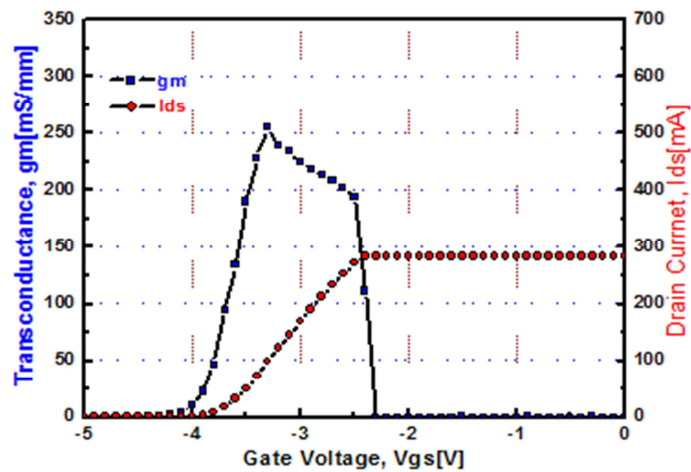


[그림 3-8] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력소자 사진

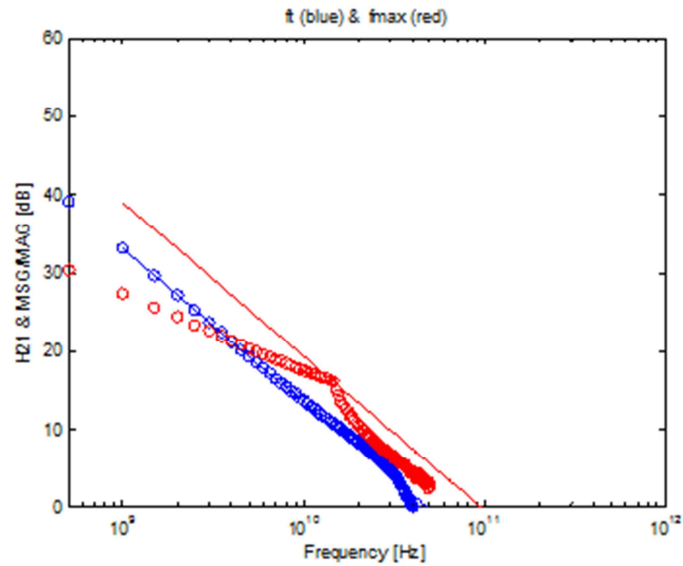


[그림 3-9] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT I-V 측정 결과

DC 측정은 I-V 측정과 transconductance(G_m) 측정을 수행하였다. 일정한 드레인 전압 범위에서 게이트 전압을 변화시켰을 때의 드레인 전류값 변화를 살펴보는 I-V 측정과 일정한 드레인 전압에서 게이트 전압을 변화시켰을 때의 드레인 전류와 트랜스 컨덕턴스 변화를 측정하는 트랜스 컨덕턴스 측정 2 가지를 수행하였다. I-V 측정조건은 $V_{ds} = 0 \sim 20$ V, $V_{gs} = -5 \sim -2$ V (0.5 V step)이고, G_m 은 $V_{ds} = 25$ V 에서 $V_{gs} = -5 \sim 0$ V 이다. [그림 3-9]는 제작된 게이트 폭이 6×200 μm 인 GaN HEMT의 I-V 측정 결과이며, [그림 3-10]은 총 게이트 폭(W_g)이 1200 μm 인 GaN HEMT 소자의 트랜스 컨덕턴스 (G_m)을 측정한 그래프이다. 전체 게이트 폭이 1200 μm 인 GaN HEMT 소자는 $V_{ds} = 25$ V 에서 $I_{dss} > 283$ mA이며 우수한 핀치오프 특성을 나타내었다. 실제 측정시의 드레인 전류의 한계 때문에 V_g 가 0 V 까지 측정하지 못했다. 트랜스 컨덕턴스 그래프로부터 최대 트랜스 컨덕턴스는 255 mS/mm 이다. 소자가 동작하는 임계전압은 -4.2 V이며 핀치오프 상태에서의 게이트 전압이 -6 V 일 때의 누설전류는 100 μA 이다.

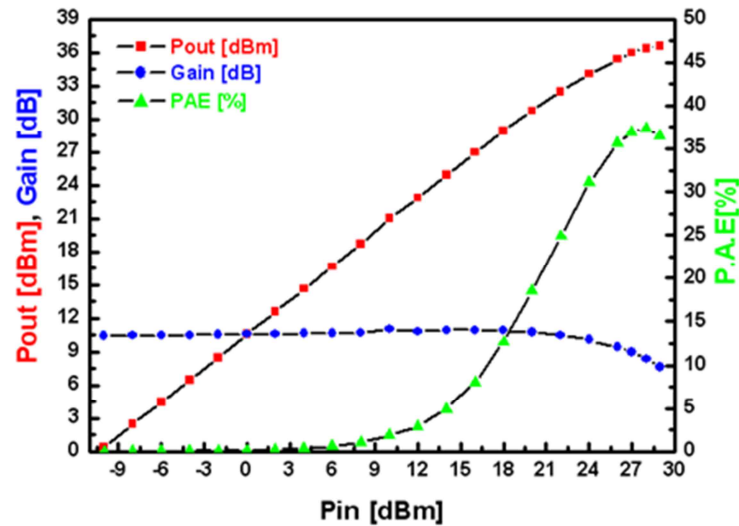


[그림 3-10] 제작된 게이트 폭이 6×200 μm 인 GaN HEMT transconductance 측정 결과



[그림 3-11] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT RF 측정 결과

RF 특성을 측정하기 위한 측정조건은 주파수 500 MHz~50 GHz 에서 드레인 전압 $V_d = 25 \text{ V}$, 게이트 전압 -3.2 V 이고 이 조건에서 측정한 S-parameter 를 H21 과 MSG(maximum Stable Gain), MAG(Maximum Available Gain)을 이용하여 [그림 3-11] 과 같이 차단주파수(cutoff Frequency, f_t), 최대발진주파수(Maximum Oscillation Frequency, f_{max})를 추출하였다. 게이트 폭이 $1200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 소자는 $V_{ds} = 25 \text{ V}$, $V_{gs} = -3.0 \text{ V}$ 에서 $f_t = 47.79 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 95.31 \text{ GHz}$ 이다.

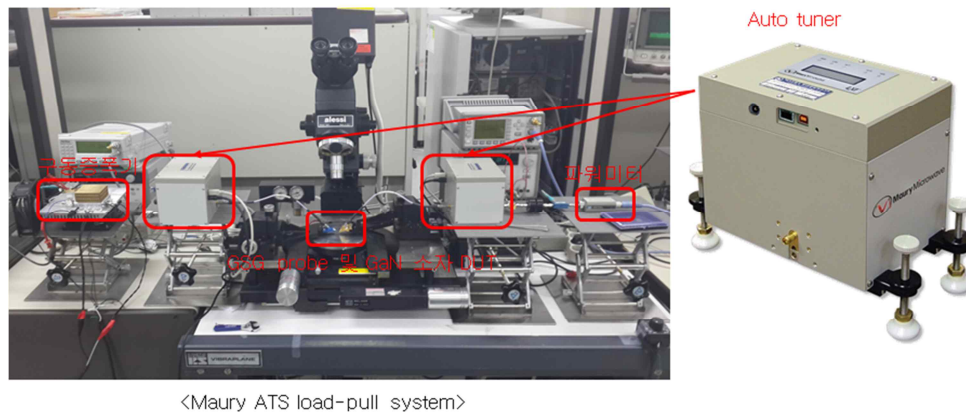


[그림 3-12] 제작된 게이트 폭이 $6 \times 200 \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력 측정 결과

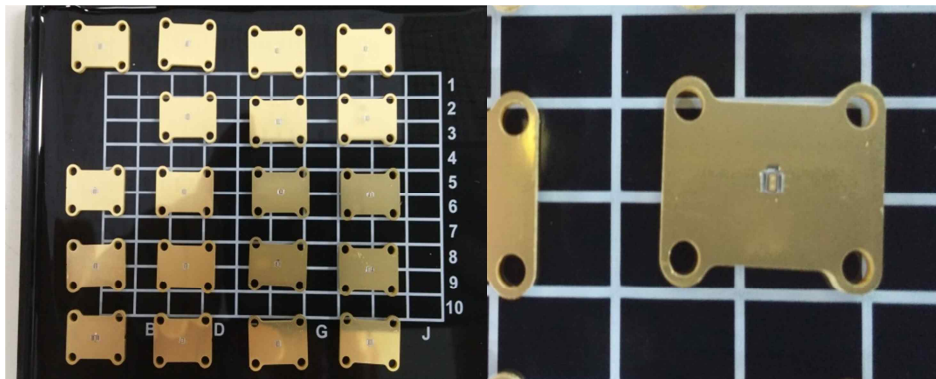
드레인 전압 30 V, 게이트 전압 -3.0 V, 주파수 16 GHz 에서 총 게이트 길이 1200 μm 인 GaN HEMT 전력소자의 전력측정 결과는 [그림 3-12]와 같다. P1dB = 34.4 dBm 이었으며 포화전력(Psat)은 36.59 dBm (4.6W) 였다. 따라서 최대전력밀도는 3.8 W/mm의 특성을 보였다. 이때, 전력이득 Pgain = 10.9 dB 였고 전력부가효율 PAE = 37.4 % 값을 나타내었다.

2.3 GaN HEMT ($W_g = 6 \times 100 \mu\text{m}$) 출력 전력특성 결과

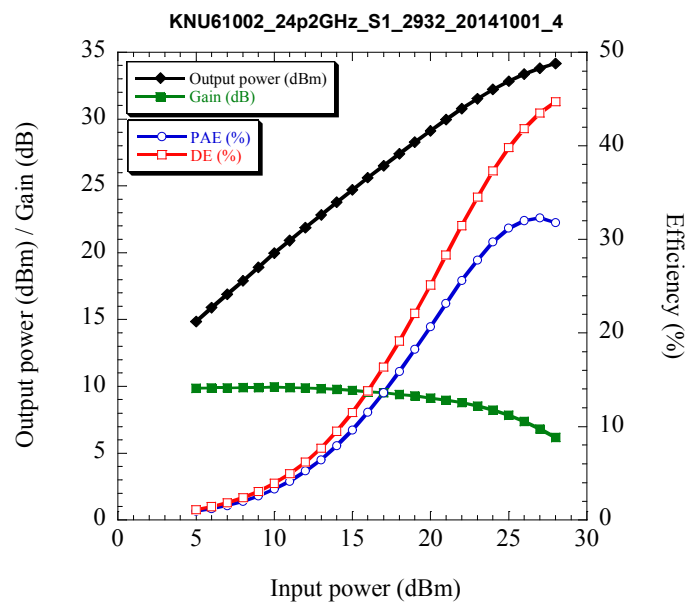
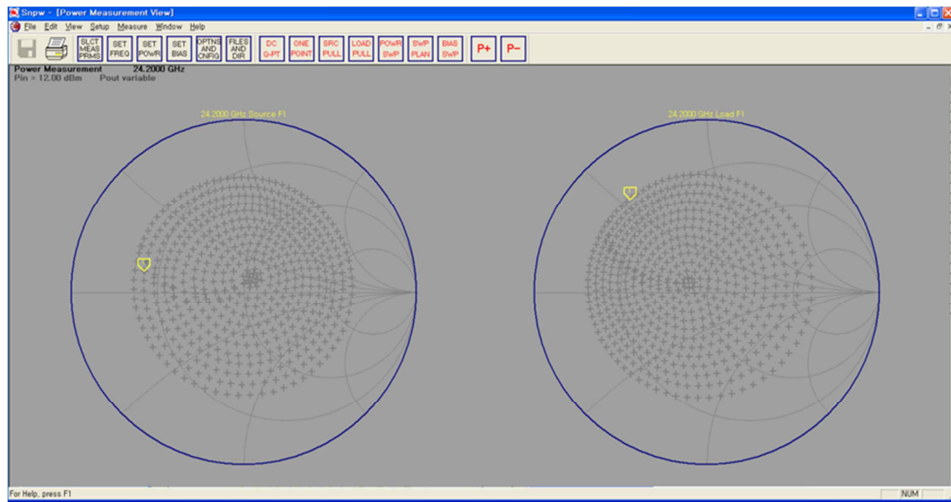
GaN HEMT ($W_g = 6 \times 100 \mu\text{m}$) 소자의 24.2GHz 에서의 출력전력특성을 측정하기 위하여 [그림 3-13]과 같이 로드풀 측정 시스템을 구성하였다. 측정 소자의 열적 안정도를 높이기 위하여 [그림 3-14]와 같이 방열판을 이용하여 칩을 Eutectic bonding 처리하였다. 드레인 전압 30 V, 게이트 전압 -3 V, 주파수 24.2GHz 에서 총 게이트 길이 600 μm 인 GaN HEMT 전력소자의 전력측정 결과는 [그림 3-15]와 같다. 포화전력(Psat)은 34.1 dBm(2.6W)였다. 따라서 최대전력밀도는 4.33W/mm의 우수한 특성을 보였다. 이때, 전력이득 Pgain = 9 dB 였고 전력부가효율 PAE = 33.4% 이고 드레인 효율은 45.2% 값을 나타내었다.



[그림 3-13] 24.2GHz 전력특성 측정을 위한 로드풀 측정 시스템 구성도



[그림 3-14] 24.2GHz 전력특성 측정을 위한 방열판 제작(Eutectic bonding)



[그림 3-15] 24.2GHz 전력특성 측정결과

제 3 절 결론

24GHz 대역에서 동작하는 GaN 기반의 HEMT 소자를 설계 및 제작 공정하고 HEMT 소자의 DC, RF 및 전력특성을 살펴보았다. 드레인 전압 30 V, 게이트 전압 -3 V, 주파수 24.2GHz 에서 총 게이트 길이 600 μm 인 GaN HEMT 전력소자의 전력측정 결과 포화전력(Psat)은 34.1 dBm(2.6W)이고 최대전력밀도는 4.33W/mm 의 우수한 특성을 보였다. 전력이득은 Pgain = 9 dB 였고 전력부가효율 PAE = 33.4%이고 드레인 효율은 45.2% 값을 나타내었다. K-대역에서 동작하는 차세대 레이더 등의 핵심부품으로 활용될 예정으로 수율 향상을 통해서 생산성을 높이는 연구가 지속될 필요가 있는 것 판단되어진다.

제 4 장 결 론

제 4 장 결 론

수요자 중심 화합물반도체 부품산업 기반강화 사업을 수행한 결과 다음과 같은 연구분야에서 아래의 연구 결론을 얻었다.

- ETRI가 보유하고 있는 HEMT기술을 활용하여 GaN 기반의 HEMT 전력소자를 제작하였으며 그 특성을 살펴보았다. 제작한 X-밴드 GaN HEMT 전력소자(X010000, $L_g=0.25\ \mu\text{m}$, $W_g=10\ \text{mm}$)를 패키징하여 로드풀 시스템을 통해 전력특성을 측정하였으며, 게이트 길이가 $0.25\ \mu\text{m}$ 이고 게이트 폭이 $10\ \text{mm}$ 인 GaN HEMT 전력소자(X010000)는 $9\ \text{GHz}$ 에서 $30\ \text{W}$ 의 출력전력을 얻었다. 측정결과를 통해 살펴본 바와 같이 GaN HEMT 전력소자(X010000)의 게이트 누설전류 특성을 개선하여 항복전압과 출력전력을 향상시키는 것이 필요하며, 원활한 방열과 효과적인 접지를 위해 후면 비어홀 공정을 적용하는 것이 요구된다. 또한 패키징에 의한 출력전력 및 전력이득 손실을 줄이기 위하여 본딩 와이어의 길이가 가능한 짧도록 패키지 구조 변경도 필요하다. 아울러 패키징한 GaN HEMT 전력소자(X010000)의 성능 균일도 향상을 위해 소자의 수율도 더욱 개선되어야 할 것이다.
- 24GHz 대역에서 동작하는 GaN 기반의 HEMT 소자를 설계 및 제작 공정하고 HEMT 소자의 DC, RF 및 전력특성을 살펴보았다. 드레인 전압 $30\ \text{V}$, 게이트 전압 $-3\ \text{V}$, 주파수 24.2GHz 에서 총 게이트 길이 $600\ \mu\text{m}$ 인 GaN HEMT 전력소자의 전력측정 결과 포화전력(P_{sat})은 $34.1\ \text{dBm}(2.6\text{W})$ 이고 최대전력밀도는 4.33W/mm 의 우수한 특성을 보였다. 전력이득은 $P_{\text{gain}} = 9\ \text{dB}$ 였고 전력부가효율 $\text{PAE} = 33.4\%$ 이고 드레인 효율은 45.2% 값을 나타내었다. K-대역에서 동작하는 차세대 레이더 등의 핵심부품으로 활용될 예정으로 수율 향상을 통해서 생산성을 높이는 연구가 지속될 필요가 있는것 판단되어진다.

약어표

- HEMT (High Electron Mobility Transistor) : 고전자 이동도 트랜지스터
- RF (Radio Frequency) : 무선주파수
- Gm (transconductance) : 상호컨덕턴스
- PKG (Package) : 패키지
- Vd (drain voltage) : 드레인 전압
- Vg (gate voltage) : 게이트 전압
- fT (Cut-off frequency) : 차단주파수
- fmax (maximum oscillation frequency) : 최대발진주파수
- PAE (Power added efficiency) : 전력부가효율
- Idss (drain saturation current) : 드레인 포화 전류
- P1dB (1-dB gain compression point) : 1dB 이득 압축점
- Wg (gate width) : 게이트 폭
- MSG (maximum stable gain) : 최대 안정 이득
- MAG (maximum available gain) : 최대 가용 이득

기술문서 구성표

● 특허출원

구 분	제 목	국명	출원(관리)/ 등록번호	등록/출원/ 제출 일자	비고
국내	반도체 소자 테스트 소켓	한국	2014-0036574	출원 (14.03.28)	
국내	정합 회로를 포함하는 소자 패키 지 및 그것의 정합 방법	한국	2014-0031644	출원 (14.03.18)	
국내	안정화된 게이트 구조를 갖는 반 도체 소자 및 그의 제조 방법	한국	2014-0017242	출원 (14.02.14)	
국내	귀환 증폭기	한국	2014-0067490	출원 (14.06.03)	
국내	반도체 채널저항 등가회로	한국	2014-0129099	출원 (14.09.26)	
국내	전계효과 트랜지스터의 제조 방법	한국	PR20140720KR	제출 (14.10.07)	
국내	RF 내부정합형 패키지용 전력소자 특성 추출 방법	한국	PR20140883KR	제출 (14.11.03)	
국내	반도체소자 테스트 장치	한국	PR20141424KR	제출 (14.11.16)	
국제	Wafer level packaged GaN power device and module substrate including the same	미국	8691627	등록 (14.04.08)	

국제	SEMICONDUCTOR DEVICE INCLUDING STEPPED GATE ELECTRODE AND METHOD OF FABRICATION METHOD THEREOF	미국	8722474	등록 (14.05.13)	
국제	COMPONENT PACKAGE INCLUDING MATCHING CIRCUIT AND MATCHING METHOD THEREOF	미국	14/478295	출원 (14.09.05)	
국제	SEMICONDUCTOR DEVICE HAVING STABLE GATE STRUCTURE AND METHOD OF MANUFACTURING THE SAME	미국	14/328247	출원 (14.07.10)	
국제	Equivalent Circuit for Semiconductor Channel Resistor	미국	PR20140615	제출 (14.09.26)	

● 기술문서

구 분	제 목	주 요 내 용	제출자	제출 일시	비고
TM	GaN HEMT 신뢰성 요인과 분석	GaN 전력소자의 신뢰 성 분석 자료	주철원	2014.09.03	
TM	정부 R&D 정책 방향 -부응하는 R&D, R&BD 협업 전략	정부 R&D 정책 방향 에 부응하는 협업 전 략 분석 자료	이경호	2014.09.01	
TM	수요자중심 기술사업 화 개선방안	수요자중심의 사업화 추진 전력 분석 자료	이경호	2014.09.02	
TM	미션재정립을 통한 수요자중심 기업지원 의 구체적 방안 제안	기업지원을 보다 확대 할수 있는 구체적 방 안에 대한 고찰	이경호	2014.09.02	
TM	Ku-band GaN HEMT 소자 측정결과(W07)	W07번 웨이퍼 Ku-대 역에서의 측정결과 정 리	김성일	2014.09.03	
TM	W05 웨이퍼 DC 특 성 측정 결과서	W05번 웨이퍼 DC 특 성 측정 결과서	이종민	2014.09.02	
TM	GaN on SiC HEMT 후면 비아홀 공정 개 발	GaN on SiC 기판의 후면 비아홀 공정 내 용 정리	민병규	2014.08.28	
TDP	AlGaIn/GaN 오믹 분 석	AlGaIn/GaN 오믹 공 정 분석 결과 정리	민병규	2014.09.03	

본 문서에서 음영 처리된 부분은 () 정보공개법 제9조의 비공개대상정보와 저작권법 및 그 밖의 다른 법령에서 보호하고 있는 제3자의 권리가 포함된 저작물로 공개대상에서 제외되었습니다.

주 의

1. 이 연구보고서는 한국전자통신연구원의 주요사업으로 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국전자통신연구원에서 수행한 주요사업 결과임을 밝혀야 합니다.