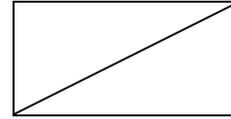


2019년 1월

18ZB1600-01-3230P



질화붕소 분리층과 소자 전사 기술을 이용한 다목적 초고주파 소자 개발

Development of Extremely High RF Multi-Purpose Device Using
Boron Nitride Release Layer and Device Transfer Technique

인 사 말 씀

무선이동통신 시스템은 5G의 상용화를 넘어 계속적으로 발전해 나갈 것 입니다. 이를 위한 핵심 기술은 보다 많은 정보를 보다 빠르게 전송하는 것 입니다. 이를 실현하기 위해서 송수신용 고주파 소자의 동작 주파수와 출력 전력은 꾸준히 증가하여 왔으며, 앞으로 그 증가 속도는 더욱 빨라질 것으로 예상되고 있습니다. 그러나 동작 주파수와 출력 전력의 향상으로 인한 송수신용 고주파 소자의 발열 증가는 고주파 소자의 성능 및 신뢰성을 저하시키는 주된 요소가 되고 있습니다.

미국과 일본을 중심으로 고주파 소자의 발열로 인한 문제점을 극복하고자 하는 연구들이 진행되고 있으나, 아직까지는 기초 연구단계에 머물러 있습니다. 우리나라의 경우 고주파 소자 기술 선진국 대비 송수신용 고주파 소자에 대한 기술 수준이 낮고 고주파 부품 기업이 영세하여, 방열 성능의 개선을 통한 고주파 소자의 성능 및 신뢰성 향상을 위한 연구가 미진한 실정입니다.

본 연구를 통해서, 제작된 고주파 소자와 기관 분리 기술, 방열 성능이 우수한 기관과 고주파 소자 접합 기술을 개발하여 고방열 기관상에서 동작하는 고출력-고주파 소자를 제작하고자 합니다. 이를 통해서 고주파 동작 시 발생하는 열로 인한 문제점을 개선하고자 합니다. 이는, 방열 성능이 향상된 고주파 소자 제작에 대한 국내 기술 수준을 높임과 동시에 국내 고주파 부품 시장의 활성화, 관련 기업의 국제 경쟁력 강화에 기여할 것으로 기대됩니다. 끝으로, 본 연구 수행을 위해 후원을 해주신 한국전자통신연구원 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드리며, 아울러 본 연구를 성실히 수행한 연구원들의 노고를 치하하는 바입니다.

2019년 1월
한국전자통신연구원 원장 이 상 훈

제 출 문

본 연구보고서는 주요사업인 "질화붕소 분리층과 소자 전사 기술을 이용한 다목적 초고주파 소자 개발"의 결과로서, 본 과제에 참여한 아래의 연구팀이 작성한 것입니다.

2019년 1월

연구책임자 : 선임연구원 장성재 (RF/전력부품연구그룹)

연구참여자 : 책임연구원 윤형섭 (RF/전력부품연구그룹)

책임연구원 배성범 (RF/전력부품연구그룹)

연구원 조규준 (RF/전력부품연구그룹)

요 약 문

I. 제 목

질화붕소 분리층과 소자 전사 기술을 이용한 다목적 초고주파 소자 개발

II. 연구목적 및 중요성

질화갈륨(GaN) 기반 고주파 소자는 에너지 밴드갭(band-gap)이 넓고, 알루미늄질화갈륨(AlGaN)/질화갈륨 계면에 존재하는 고농도 이차원전자가스층(2DEG: 2-Dimensional Electron Gas)에서의 전자 이동도가 매우 빠르다. 이러한 장점들로 인하여 경쟁기술인 실리콘(Si), 탄화규소(SiC), 그리고 갈륨비소(GaAs)에 비해서 상대적으로 짧은 연구개발 기간에도 불구하고 응용 분야가 급격히 증가하여, 이동통신 기지국 및 중계기, 선박 및 군수용 레이더, 위성통신 시스템, 테러 방지용 전파 교란기 등에 사용되는 고효율-고주파 소자에 응용되고 있다.

질화갈륨 기반 고주파 소자는 다른 경쟁기술과 마찬가지로 동작 주파수와 출력 전력 밀도 향상에 대한 요구를 계속적으로 받고 있으나, 발열로 인한 소자의 성능 및 신뢰성 저하가 문제점으로 대두되고 있다. 이를 개선하기 위해서 선진국들을 중심으로 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고효율-고주파 소자에 대한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 현재까지는 초기 연구 개발 단계에 머물러 있다.

현재 미국과 일본을 중심으로 연구되고 있는 방열 성능이 향상된 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작 기술들은 기술의 완숙도가 낮아 극복해야 할 문제점들이 많고 상용화에 사용될 기술을 예측하기 어렵다. 따라서 질화붕소 분리층과 소자 전사 기술을 활용한 고방열 기판상에서 동작하는

질화갈륨 기반 다목적 고효율-고주파 소자 제작 기술을 확보하여 선행 연구들의 단점을 극복하고 고주파 소자의 출력 전력 밀도 저하, 동작 주파수 제한과 같은 문제점을 해결하고자 한다. 이와 동시에 독자적인 원천기술의 확보를 통하여 무선 이동통신, 국방, 안보 분야의 부품 소재 기업에 차세대 먹거리를 제공하고 국가 경쟁력을 제고할 수 있다.

Ⅲ. 연구내용 및 범위

본 연구는 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고효율-고주파 소자를 제작하고, 그 특성을 분석하는 것으로 연구내용 및 범위는 아래와 같다.

- 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고효율-고주파 소자 제작에 필요한 요소 기술 개발.
- 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고효율-고주파 소자 제작 기술 개발.
- 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고효율-고주파 소자 특성 분석.

Ⅳ. 연구결과

본 연구과제의 1차년도 주요 연구결과는 다음과 같다.

1. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발

- 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기, 질화알루미늄(AIN) 버퍼층 유무, 질화갈륨 에피 박막 성장 압력에 대한 질화갈륨 에피 박막 특성을

주사전자현미경, X선회절분석, 투과전자현미경을 사용하여 분석하였음.

- N_2 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, 질화알루미늄 버퍼층 적용, 낮은 질화갈륨 에피 박막 성장 압력에서 성장된 질화갈륨 에피 박막의 결정성이 양호함을 확인하였음.
- 1 ~ 2 nm 두께의 육방형 질화붕소 박막위에 68 nm 두께의 질화알루미늄, 2 μm 이상의 질화갈륨 에피 박막이 순차적으로 성장되었음을 투과전자현미경 분석을 통해 확인함.

2. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발

- 기판과 질화갈륨 에피 박막을 분리할 때 넓은 면적을 안정적으로 분리하기 위해서 화학적 리프트-오프 방법과 물리적인 힘을 이용하는 두 가지 방법에 대한 기판 분리 실험을 진행하였음.
- 질화갈륨 에피 박막 성장에 의해서 육방형 질화붕소 박막 두께가 얇아져 화학적 리프트-오프 방법과 물리적인 힘을 이용하는 방법 모두 기판과 질화갈륨 에피 박막의 분리가 어려웠음.
- 기판과 질화갈륨 에피 박막 분리가 용이한 질화붕소 박막 두께 최적화 연구가 필요함.

3. 고방열 기판과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술 개발

- 고주파 소자와 방열 성능이 우수한 구리 기판을 골드틴(AuSn)을 접합물질로 사용하고 열과 압력을 동시에 인가하여 접합하였으며, 접합 후 고주파 소자의 성능 저하는 없었음.
- 기판의 온도와 출력 전압에 대한 소자의 발열 특성을 적외선 열화상 카메라를 사용하여 분석하였음.
- 105도 이상의 열이 발생하는 기판 온도 및 출력 전력 조건에서 고주파 소자와 구리 기판의 변형이 없음을 확인함.

V. 연구개발결과의 활용계획

고방열 기관상에서 송수신용 고주파 소자를 동작시켜 소자의 방열 및 동작 성능을 개선하면 데이터 전송 속도를 향상시킬 수 있다. 이는 대량의 정보를 빠르게 처리할 수 있는 무선 이동통신 시스템 구현을 가속화시킬 수 있다. 이를 바탕으로 국내 무선 이동통신 관련 기업들이 기술적 우위를 점할 수 있도록 도움을 준다. 뿐만 아니라, 이동통신 기지국, 자동차, 고성능 레이더, 고온 센싱 시스템 등 여러 분야에 방열 성능이 향상된 질화갈륨 기반 고주파 소자를 적용할 수 있어 생활, 국방, 안전 관련 부품 산업의 성장과 신규 고용 창출에 결정적 기여를 할 것으로 예상된다.

VI. 기대성과 및 건의

질화갈륨 기반 고주파 소자의 동작 주파수와 출력 전력을 안정적으로 증가시키기 위해서 미국과 일본을 중심으로 방열 성능이 향상된 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작에 대한 연구를 진행하고 있으나, 아직 개선해야할 문제점들이 많다. 질화붕소 분리층과 소자 전사 기술을 이용한 고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고효율-고주파 소자 제작 기술을 개발하여, 기존 선행 연구들의 단점을 극복하고 독자적인 원천기술을 확보할 수 있다. 또한, 질화갈륨 기반 고주파 소자와 기관 분리, 분리된 고주파 소자의 유연 기관으로의 전사를 통해 유연 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작 기술 확보에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

I . TITLE

Development of extremely high RF multi-purpose device using boron nitride release layer and device transfer technique

II . THE OBJECTIVES

The GaN-based RF device exhibits wide energy band-gap and high electron mobility of 2DEG(2-Dimensional Electron Gas) at AlGaN/GaN hetero-interface. Thanks to these advantages, the applications of the GaN-based high-power/-frequency devices sharply increase such as the base station and repeater of the wireless mobile communication system, radars for the vessel and military, satellite communication system, and jamming system for the terrorism prevention, compared to the competing technology in terms of Si-, SiC-, and GaAs-based devices, despite the study period of the GaN-based technology is shorter than others.

Like for other competing technologies, the GaN-based RF(radio-frequency) devices are continuously required to improve the operating frequency and output power density. However, the deterioration of the device performance and reliability is caused by the enhanced self-heating with increasing the operating frequency and output power density. To overcome this issue, the developed countries in GaN-based technology are researching the high-power/-frequency devices operated on the high thermal dissipation substrate. But, the studies lie in the fundamental research step.

The GaN-based devices enhanced thermal dissipation which are currently developing in United States and Japan connote the several problems needed to be improved. In addition, to anticipate the commercialized technique is very difficult at this moment. Therefore, the securement of the GaN-based multi-purpose high-power/-frequency device processing technique which is demonstrated by using the boron nitride release layer and device transfer technique onto the high thermal dissipation substrate should surmount the issues of the advanced researches, limitation of the operating frequency, and degradation of the device reliability. At the same time, this study can provide the next generation technology to the related industries field such as wireless mobile communication, military, and security field through the securement of the original technology, improving national competitiveness.

III. THE CONTENTS AND SCOPE OF THE STUDY

The aim of this study is to demonstrate the GaN-based multi-purpose high-power/-frequency devices operated on the high thermal dissipation substrate and characterize the device properties. The research contents and range are shown below.

- The development of the elementary technologies to demonstrate the GaN-based multi-purpose high-power/-frequency device operated on the high thermal dissipation substrate.
- The development of the GaN-based multi-purpose high-power/-frequency device operated on the high thermal dissipation substrate processing

technique.

- The characterization of the GaN-based multi-purpose high-power/-frequency device operated on the high thermal dissipation substrate.

IV. RESULTS

The key results of this study are listed below.

1. The GaN epitaxial layer growth technique development applicable for high-frequency device.

- The GaN epitaxial layer was characterized according to the growth ambience of the hexagonal boron nitride, existence of the AlN buffer layer, and growth pressure of the GaN epitaxial layer through the scanning electron microscope, X-ray diffraction, and transmission electron microscope.
- The crystallinity of the GaN epitaxial layer was excellent when the GaN layer was grown on the hexagonal boron nitride grown in N₂ ambience. The AlN buffer layer was employed and the GaN epitaxial layer was grown at low pressure to obtain excellent crystallinity of the GaN epitaxial layer.
- We have confirmed through the transmission electron microscope measurement that the 1 ~ 2 nm-thick hexagonal boron nitride, 68 nm thick-AlN buffer layer, thicker than 2 μm-thick GaN layer were sequentially grown on the sapphire substrate.

2. The GaN-based RF device separation technique development.
 - We have tested the two separation techniques which are the chemical lift-off and mechanical force methods in order to separate the wide area of the GaN epitaxial layer from the substrate.
 - The two separation methods such as the chemical lift-off and mechanical force are difficult to separate the GaN epitaxial layer from the substrate since the thickness of the hexagonal boron nitride was thinned down during the GaN epitaxial layer growth.
 - A study is required to achieve the optimized hexagonal boron nitride thickness for the separation of the GaN epitaxial layer from the substrate.

3. The bonding technique development to bond the high thermal dissipation substrate and GaN-based RF devices.
 - The GaN-based RF device and copper substrate were bonded with the Gold-tin as a bonding material. The heat and pressure were simultaneously introduced to bond the copper substrate and GaN-based RF device. After bonding, there was no device performance deterioration.
 - The heat dissipation of the GaN-based device was investigated using the infra-red thermal imaging camera as a function of the substrate temperature and output power.
 - The copper substrate was not deformed even though the device temperature was over 105°C.

V . EXPECTED RESULT & PROPOSITION

The GaN-based RF devices operated on the high thermal dissipation substrate which exhibit the improvement of the heat dissipation and device performance should accelerate the demonstration of the wireless mobile communication system with high data transmission rate. This technology makes possible to hold a dominant position of the domestic companies related to the GaN-based device technology. In addition, the GaN-based device improved heat dissipation can be employed to the base station and repeater of the wireless mobile communication system, high performance radar system, vehicle, and sensing system operated at high temperature. As a result, the GaN-based RF device operated on the high thermal dissipation substrate should contribute to industries linked to the human life, defence, and security and create of jobs.

To improve the operation frequency and output power of the GaN-based RF devices, United states and Japan are investigating the GaN-based RF device which exhibits improved heat dissipation. However, there are several issues which should be optimized. By developing the GaN-based high-power/-frequency devices operated on the high thermal dissipation substrate using the hexagonal boron nitride release layer and device transfer technique, we can overcome the issues of the advanced researches and secure the original technology by ourselves. In addition, we can also retain the flexible GaN-based RF device processing technology through the development of the GaN-based RF device separation technique from the substrate and the device transfer technique onto the flexible substrate.

CONTENTS

CHAPTER 1. Introduction.....	1
SECTION 1. Necessity of the Study.....	2
SECTION 2. Significance of the Study.....	3
SECTION 3. Purpose of the Study.....	4
SECTION 4. Expected effect of the Study.....	5
CHAPTER 2. Body.....	6
SECTION 1. Research and development purpose.....	7
1. The final research and development purpose.....	7
2. Research and development purpose of the year to date.....	7
SECTION 2. Research results of the year to date.....	8
1. The GaN epitaxial growth technique development for RF application	8
a. Property of the hexagonal boron nitride layer.....	8
b. Property of the GaN epitaxial layer according to the existence of the AlN buffer layer.....	10
c. Property of the GaN epitaxial layer according to the growth environment of the hexagonal boron nitride and growth pressure of the GaN epitaxial layer.....	14
d. Summary of the GaN epitaxial growth technique development for RF application.....	20
2. The GaN-based RF device separation technique development.....	20
a. The GaN epitaxial layer separation using chemical lift-off.....	21
b. The GaN epitaxial layer separation using mechanical force.....	24
c. Summary of the the GaN-based RF device separation technique development.....	28

3. The GaN-based RF device bonding technique development onto the high thermal dissipation substrate.....	28
a. The GaN-based RF device bonding onto the copper substrate.....	28
b. Heat dissipation proptery of the GaN-based device as a function of the copper substrate temperature.....	30
c. Heat dissipation proptery of the GaN-based device as a function of the output power.....	34
d. Summary of the GaN-based RF device bonding technique development onto the high thermal dissipation substrate.....	35
SECTION 3. Results optimization of the year of date.....	36
1. The GaN epitaxial growth technigue development for RF application.....	36
2. The GaN-based RF device separation technique development.....	36
CHAPTER 3. Expected effect of the final research and development results.....	37
SECTION 1. Preoccupancy of the future research field.....	38
SECTION 2. Ripple effects.....	39
CHAPTER 4. Conclusion.....	40
References.....	43
Abbreviations.....	44
List of the technical documents.....	45

TABLES

<Table 1> Conditions of the GaN epitaxial growth.....	8
<Table 2> Half-width results of the X-ray diffraction measurement according the the GaN epitaxial growth conditions.....	19

FIGURES

<Figure 1> Transmission electron microscope images of the hexagonal boron nitride film grown on the sapphire substrate.....	9
<Figure 2> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer cross-section grown without the AlN buffer layer.....	10
<Figure 3> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer surface grown without the AlN buffer layer.....	11
<Figure 4> X-ray diffraction measurement results of the GaN epitaxial layer grown without the AlN buffer layer.....	11
<Figure 5> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer cross-section grown on the AlN buffer layer.....	12
<Figure 6> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer surface grown with/without the AlN buffer layer.....	13
<Figure 7> X-ray diffraction measurement results of the GaN epitaxial layer grown on the AlN buffer layer...	13
<Figure 8> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer surface using the hexagonal boron nitride grown at N ₂ ambience and AlN buffer layer.....	14
<Figure 9> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer cross-section grown at low pressure (100 Torr). The hexagonal boron nitride grown at N ₂ ambience and AlN buffer layer were employed.....	15

<Figure 10> Scanning electron microscope images of the GaN epitaxial layer surface according to the hexagonal boron nitride growth ambience and GaN epitaxial layer growth pressure.....	16
<Figure 11> X-ray diffraction measurement results of the GaN epitaxial layer according to the hexagonal boron nitride growth ambience and GaN epitaxial layer growth pressure.....	17
<Figure 12> X-ray diffraction measurement results of the GaN epitaxial layer. The hexagonal boron nitride grown at N ₂ ambience, AlN buffer layer, and 100 Torr GaN growth pressure were employed.....	18
<Figure 13> Transmission electron microscope images of the GaN epitaxial layer. The hexagonal boron nitride grown at N ₂ ambience, AlN buffer layer, and low GaN growth pressure were employed.....	19
<Figure 14> The images of the experimental and control samples for the chemical lift-off experiment...	22
<Figure 15> The image of the experimental and control samples dipped into the Al etchant for the chemical lift-off experiment.....	23
<Figure 16> The image of the experimental and control samples dipped into the Al etchant heated to 85°C for the chemical lift-off experiment.....	24
<Figure 17> The image of the sample prepared for the GaN epitaxial layer separation experiment using mechanical force.....	25
<Figure 18> The image of the experimental setup for the GaN epitaxial layer separation experiment using mechanical force.....	26
<Figure 19> The GaN epitaxial layer separation experiment using mechanical force. Force was introduced at the middle of the sample.....	27

<Figure 20> The GaN epitaxial layer separation experiment using mechanical force. Force was introduced at the edge of the sample.....	27
<Figure 21> The images of the GaN-based RF devices after dicing and bonded onto the copper substrate....	29
<Figure 22> The transfer characteristics of the GaN-based RF devices before and after bonding onto the copper substrate.....	30
<Figure 23> The images of the packaged GaN-based RF devices for the heat dissipation measurement.....	31
<Figure 24> Heat dissipation measurement results of the GaN-based RF device with the substrate temperature of 25°C, gate voltage of -3.279 V, and drain voltage of 10 V.....	32
<Figure 25> Heat dissipation measurement results of the GaN-based RF device with the substrate temperature of 50°C, gate voltage of -3.279 V, and drain voltage of 10 V.....	32
<Figure 26> Heat dissipation measurement results of the GaN-based RF device with the substrate temperature of 85°C, gate voltage of -3.279 V, and drain voltage of 10 V.....	33
<Figure 27> Heat dissipation measurement results of the GaN-based RF device with the substrate temperature of 85°C, gate voltage of -3.279 V, and drain voltage of 10 V (15X magnified).....	33
<Figure 28> Heat dissipation measurement results of the GaN-based RF device with the substrate temperature of 85°C gate voltage of -3.279 V, and drain voltage of 20 V.....	34
<Figure 29> Heat dissipation measurement results of the GaN-based RF device with the substrate temperature of 85°C, gate voltage of -3.279 V, and drain voltage of 30 V.....	35

목 차

제1장. 서론.....	1
제1절. 연구의 필요성.....	2
제2절. 연구의 중요성.....	3
제3절. 연구의 목적.....	4
제4절. 연구의 기대효과.....	5
제2장. 본론.....	6
제1절. 연구 개발 목표.....	7
1. 최종 연구 개발 목표.....	7
2. 당해 연구 개발 목표.....	7
제2절. 당해 연구 결과.....	8
1. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발.....	8
가. 육방형 질화붕소 박막 특성.....	8
나. AIN 버퍼층 유무에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성.....	10
다. 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 에피 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성.....	14
라. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발 요약.....	20
2. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발.....	20
가. 화학적 리프트-오프를 활용한 질화갈륨 에피 박막 분리.....	21
나. 물리적인 힘을 활용한 질화갈륨 에피 박막 분리.....	24
다. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발 요약.....	28

3. 고방열 기관과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술 개발.....	28
가. 질화갈륨 기반 고주파 소자와 구리 기관 접합.....	28
나. 구리 기관 온도에 따른 질화갈륨 기반 고주파 소자의 발열 특성.....	30
다. 출력 전력에 따른 질화갈륨 기반 고주파 소자의 발열 특성.....	34
라. 고방열 기관과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술 개발 요약.....	35
제3절. 당해 연구 결과 최적화.....	36
1. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발.....	36
2. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발.....	36
제3장. 최종 연구개발 결과 파급효과.....	37
제1절. 미래 연구 분야 선점.....	38
제2절. 파급효과.....	39
제4장. 결론.....	40
참고문헌.....	43
약어표.....	44
기술문서구성표.....	45

표 목 차

<표1> 질화갈륨 에피 박막 성장 조건.....	8
<표2> 질화갈륨 에피 박막 성장 조건에 따른 X선회절 반치폭.....	19

그 립 목 차

<그림1> 사파이어 기판에 성장된 육방형 질화붕소 박막 투과현미경 사진.....	9
<그림2> AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면 주사전자현미경 사진.....	10
<그림3> AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 표면 주사전자현미경 사진.....	11
<그림4> AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.....	11
<그림5> AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면 주사현미경 사진.....	12
<그림6> AlN 버퍼층 유무에 따른 질화갈륨 에피 박막 표면 주사전자현미경 사진.....	13
<그림7> AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.....	13
<그림8> N ₂ 분위기에서 성장된 질화붕소 박막 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 표면 주사전자현미경 사진. AlN 버퍼층이 적용되었음.....	14
<그림9> 낮은 질화갈륨 성장 압력(100 Torr)에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면 주사전자현미경 사진. N ₂ 분위기에서 성장된 질화붕소 박막이 사용되었으며, AlN 버퍼층이 적용되었음.....	15
<그림10> 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 표면 주사현미경 사진.....	16
<그림11> 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.....	17
<그림12> N ₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, AlN 버퍼층 적용, 100 Torr 성장 압력에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.....	18

<그림13>	N ₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, AlN 버퍼층 적용, 100 Torr 성장 압력에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 투과전자현미경 사진.....	19
<그림14>	화학적 리프트-오프 실험을 위해 준비된 실험군과 대조군 샘플 사진.....	22
<그림15>	화학적 리프트-오프를 위해 실험군과 대조군을 알루미늄 에천트에 담근 사진.....	23
<그림16>	화학적 리프트-오프를 위해 실험군과 대조군을 85도로 가열된 알루미늄 에천트에 담근 사진.....	24
<그림17>	물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험을 위해 준비된 샘플 사진.....	25
<그림18>	물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험 셋업(setup).....	26
<그림19>	물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험. 샘플 중앙에 물리적인 힘을 인가함.....	27
<그림20>	물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험. 샘플 가장자리에 물리적인 힘을 인가함.....	27
<그림21>	다이싱이 완료된 질화갈륨 기반 고주파 소자와 구리 기판에 접합된 질화갈륨 기반 고주파 소자 사진.....	29
<그림22>	구리 기판과 접합하기 전과 후의 질화갈륨 기반 고주파 소자 전달 특성.....	30
<그림23>	소자에서의 발열 측정을 위해서 패키징된 질화갈륨 기반 고주파 소자 사진.....	31
<그림24>	기판온도 25도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V 에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.....	32
<그림25>	기판온도 50도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V 에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.....	32
<그림26>	기판온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V 에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.....	33

<그림27> 기판온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V 에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과 (15배율로 확대하여 측정한 사진).....	33
<그림28> 기판온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 20 V 에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.....	34
<그림29> 기판온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 30 V 에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.....	35

제 1 장. 서 론

제 1 장. 서 론

제1절. 연구의 필요성

모바일/IoT(Internet of Things) 기기의 적용 범위는 실시간으로 연결되는 사람과 사람/사람과 사물의 수가 증가하면서 급격하게 증가하고 있다. 이에 따라서 무선 이동통신 네트워크는 5G 를 뛰어넘어 계속적으로 발전할 것으로 예상되고 있다. 또한, 산업 현장에서는 재해 예방을 위해서 고온의 환경을 모니터링하고 위험을 감지할 수 있는 신뢰성 있는 센싱 시스템에 대한 필요성이 증가하고 있다. 국방, 안보 분야에서는 전투기, 드론, 미사일 등을 탐지하고, 정밀하게 타격할 수 있는 고출력-고성능 레이더 시스템에 대한 요구가 커지고 있다.

이러한 시스템들에 공통적으로 사용되는 핵심 부품인 송수신용 고주파 소자의 출력 전력 밀도와 동작 주파수는 시스템의 요구사항을 만족시키기 위해서 계속적으로 증가하고 있다. 그러나, 출력 전력 밀도와 동작 주파수의 증가는 소자 내부의 발열을 증가시켜 소자의 신뢰성과 성능을 저하시킨다 [1].

따라서 기확보된 질화물 기반 화합물반도체 제작 기술들을 활용하여 고주파 소자를 제작하고 방열 특성이 좋은 고방열 기관 상에서 고주파 소자를 동작시켜 소자에서의 발열로 인한 문제점을 개선할 필요성이 있다. 이를 통해서 고주파 소자의 출력 전력 밀도 저하, 동작 주파수 제한과 같은 문제점을 해결함과 동시에 다양한 시스템에서 요구하는 성능을 충족시킬 수 있다.

제2절. 연구의 중요성

질화갈륨(GaN) 기반 고주파 소자는 실리콘(Si), 탄화규소(SiC), 그리고 갈륨비소(GaAs)와 같은 경쟁 기술에 비해서 에너지 밴드갭(band-gap)이 넓고, 알루미늄질화갈륨(AlGaN)/질화갈륨 계면에 존재하는 고농도 이차원전자가스층(2DEG: 2-Dimensional Electron Gas)에서의 높은 전자 이동도로 인하여 고주파 소자와 전력 반도체에 응용되고 있다. 질화갈륨 기반 고주파 소자는 경쟁 기술 대비 광대역 주파수에 적용이 가능하고, 높은 출력 전력 특성을 획득할 수 있어[2], 상대적으로 짧은 연구 기간에도 불구하고 응용 분야가 급격히 증가해 이동통신 기지국 및 중계기 시스템, 선박 및 군수용 레이더, 위성통신 시스템, 테러 방지용 전파 교란기 등에 적용되는 송수신 장치의 핵심 부품으로 사용되고 있다.

또한, 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작 기술은 고난이도의 기술력을 필요로 하며, 현재 우리나라는 미국, 일본, 유럽으로부터 전량 수입하여 사용하고 있다. 뿐만 아니라, 질화갈륨 기반 고주파 소자는 수출승인(E. L.: Export License)에 의해서 수입이 제한되고 있으며, 고가의 비용을 지불하고 수입하였어도 이를 활용하여 생산되는 제품 및 제품의 수출에 대해서도 통제를 받는다.

이러한 질화갈륨 기반 고주파 소자 역시 경쟁기술과 마찬가지로 동작 주파수와 출력 전력 밀도 향상에 대한 요구를 받고 있다. 이때 발생하는 소자의 발열로 인한 성능 및 신뢰도 저하를 개선하기 위해서 선진국들(미국, 일본)을 중심으로 고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고풍력-고주파 소자에 대한 연구가 진행되고 있으나 현재까지는 초기 연구 개발 단계에 머물러 있다. 따라서, 방열 성능이 개선된 질화갈륨 기반 다목적 고풍력-고주파 소자 제작 기술의 확보를 통해 소자의 동작 주파수 및 출력 전력을 향상시키고, 데이터 전송 속도를 증가시킬 수 있다. 이는 4차 산업혁명에 필수적인 요소 기술이며 독자적인 원천기술 확보가 반드시 필요한 기술이다.

제3절. 연구의 목적

미국 메사추세츠공과대학(MIT)에서는 다이아몬드 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고주파 소자에 대한 소자 구조 최적화 연구를 진행하고 있다[3]. 레이시온(Raytheon)에서는 서로 다른 열전도도를 가지는 다층구조의 다이아몬드 박막을 사용하여 질화갈륨 기반 고주파 소자의 방열 성능을 높이기 위한 연구를 진행하고 있다[4]. 일본은 일본전신전화(NTT)에서 단결정 다이아몬드 기판을 사용한 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고주파 소자에 대한 연구를 진행하고 있다[5].

그러나 현재 연구되고 있는 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작 기술들은 기술의 완숙도가 낮아 극복해야 할 문제점들이 많고 상용화에 사용될 기술을 예측하기 어려워 표준화 활동이 매우 미비하다. 율(Yole Development)의 예측[6]과 선행 기술의 장단점으로 미루어 보면 실리콘, 탄화규소 또는 사파이어 기판에 제작된 질화갈륨 기반 고주파 소자의 기판을 제거하고 고방열 기판과 접합하는 방법이 가장 상용화에 근접한 기술로 예상된다. 이 기술은 다른 선행 기술과 비교하여 소자 제작 공정이 간단하고, 소자 제작 단가가 상대적으로 낮다는 장점이 있으나 기판 제거 과정에서 발생하는 소자 성능 및 수율 저하는 해결해야 할 과제로 남아있다.

선행 연구의 단점을 극복할 수 있는 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고효율-고주파 소자 제작 기술의 확보를 위해서 육방형 질화붕소 분리층이 삽입된 고주파용 질화갈륨 에피 소재를 제작하고, 이를 활용하여 질화갈륨 기반 고주파 소자를 제작한다. 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작 후 육방형 질화붕소 분리층에 물리적인 힘을 인가하여 기판과 고주파 소자를 분리하고, 분리된 고주파 소자를 고방열 기판과 접합하여 방열 성능이 개선된 다목적 고효율-고주파 소자를 제작한다. 이를 통해서 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작에 있어서 기존 기술 대비 소자 제작 공정을

간소화하고, 성능과 신뢰성을 개선하며, 소자 제작 가격을 절감하고자 한다.

제4절. 연구의 기대효과

기술적으로는 육방형 질화붕소 분리층이 삽입된 고품질 고주파 소자용 질화갈륨 에피 박막 성장 기술을 개발하여 핵심 소재 기술을 확보할 수 있다. 이와 동시에 육방형 질화붕소 분리층에 인가된 물리적인 힘을 활용한 기판과 고주파 소자 분리 기술과 고방열 기판과 고주파 소자 접합 기술의 개발을 통해 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고출력-고주파 소자 제작 기술을 확보하고, 고부가가치 부품 기술을 선점할 수 있다.

산업적으로는 고방열 기판상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고출력-고주파 소자를 무선 이동통신 네트워크, 고성능 레이더 시스템, 고온환경에서 동작하는 센싱 시스템에 적용함으로써 인하여 국내 고주파 소자 기반 부품 산업의 성장에 도움을 줄 수 있다. 또한, 국제 경쟁력이 떨어지는 국방 관련 부품 업체에 질화갈륨 기반 고출력-고주파 소자 및 소자 제작 기술을 제공하여 국방 관련 부품의 국산화 및 관련 산업의 경쟁력을 향상시킬 수 있다. 질화갈륨 기반 다목적 고출력-고주파 소자는 모바일/IoT 기기, 선박용 레이더 등에도 적용 가능해 국내 부품 소재 기업에 차세대 먹거리를 제공하며, 신규 시장에 참여하도록 유도하여 국가 경쟁력 제고에 도움을 줄 수 있다.

경제적으로는 2022년까지 세계적으로 \$756.6M에 이를 것으로 예상되는[6] 무선 이동통신 네트워크에 적용되는 질화갈륨 기반 고주파 소자 시장과 계속적으로 증가하고 있는 군수용 질화갈륨 기반 고주파 소자 시장에 장기간 안정적으로 고주파 소자를 공급함과 동시에 독자적인 기술확보를 통해서 가파르게 증가하고 있는 질화갈륨 기반 고주파 소자 시장을 선점할 수 있다.

제 2 장. 본 론

제 2 장. 본 론

제1절. 연구 개발 목표

1. 최종 연구 개발 목표

고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고출력-고주파 소자 제작 기술 개발을 통해서 아래의 성능 목표를 만족하는 질화갈륨 기반 다목적 고출력-고주파 소자를 제작하는 것이 최종 연구 개발 목표이다. 성능 목표는 상온에서 측정된 고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고출력-고주파 소자의 목표 성능이다.

게이트 길이: 500 ± 100 nm

최대 트랜스컨덕턴스: 100 mS/mm 이상

항복전압: 70 V 이상

차단주파수: 5 GHz 이상

최대발진주파수: 10 GHz 이상

2. 당해 연구 개발 목표

고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 다목적 고출력-고주파 소자 제작에 필요한 요소 기술을 개발하는 것이며, 해당 요소 기술들은 아래와 같다.

- 1) 고주파용 질화갈륨 기반 에피 성장 기술 개발
- 2) 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발
- 3) 고방열 기관과 질화갈륨 기반 고주파 소자 집합 기술 개발

제2절. 당해 연구 결과

1. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발

육방형 질화붕소 박막 성장 분위기, AlN 버퍼층의 유무, 질화갈륨 에피층 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막의 특성을 연구하였다. 육방형 질화붕소 박막은 유기금속화학증착법(MOCVD)을 활용하여 사파이어 기판위에 성장되었다. AlN 버퍼층 및 질화갈륨 에피 박막 역시 유기금속화학증착법을 통해서 육방형 질화붕소 박막위에 성장되었으며, AlN 버퍼층은 1020도 100 Torr에서, 질화갈륨 에피 박막은 1050도에서 성장되었다. 성장된 질화갈륨 에피 박막은 주사전자현미경(SEM), X선회절분석(XRD), 그리고 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 분석하였다.

<표 1> 질화갈륨 에피 박막 성장 조건.

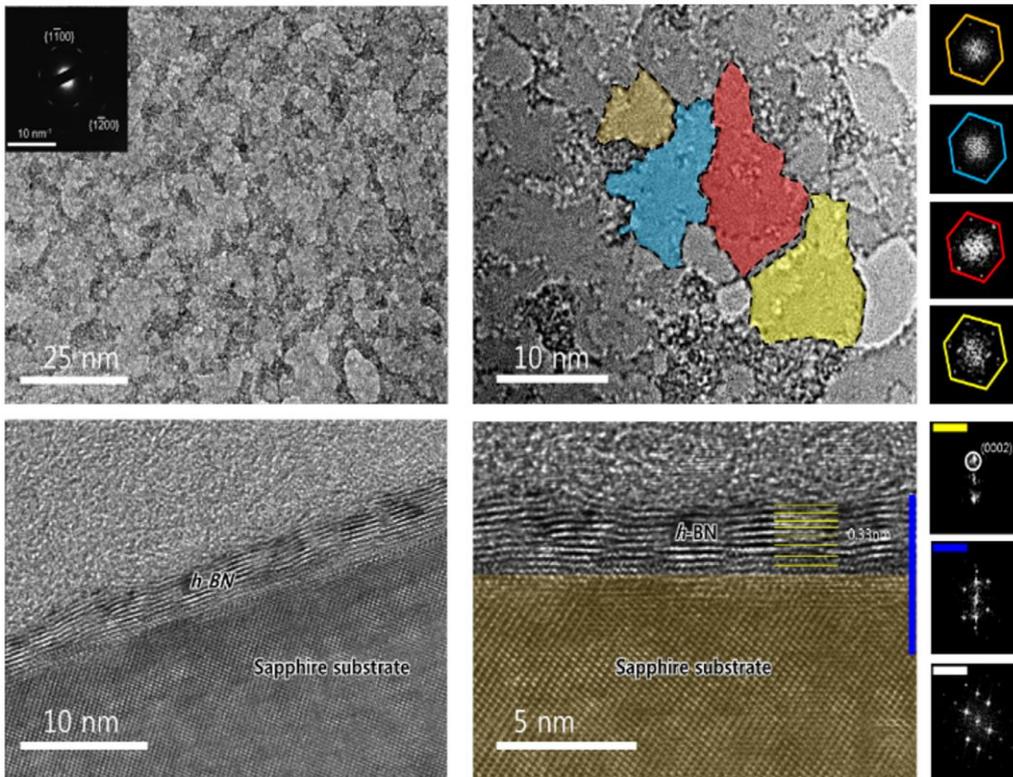
샘플 번호	육방형 질화붕소 박막 성장 분위기	질화갈륨 성장 조건	
		AlN 버퍼층 유무	성장 압력 (Torr)
1	H ₂	무	500
2	H ₂	유	500
3	N ₂	유	500
4	N ₂	유	100

가. 육방형 질화붕소 박막 특성

육방형 질화붕소 박막은 사파이어 기판위에 유기금속화학증착법을 사용하여 성장되었으며, 성장된 박막의 두께는 2 ~ 3 nm 이다. 1050도, 30 mbar의 성장 조건에서 펄스모드로 성장되었으며, 전체 펄스 사이클은 200회

그리고 3족과 5족의 비율은 30000이다. 육방형 질화붕소 박막의 특성을 향상시키기 위해서 사파이어 기판에 육방형 질화붕소 박막을 성장시킨 후 1600도에서 열처리 하였다.

그림 1은 포항공과대학교 김종규 교수 연구실에서 사파이어 기판에 성장된 육방형 질화붕소 박막을 투과전자현미경을 사용하여 분석한 그림이다. 육방형 질화붕소 박막은 다결정질로 그레인(grain) 크기는 수 나노미터로 측정되었다. 하지만, 성장된 육방형 질화붕소 박막의 결정방향은 모든 그레인에서 동일하였으며, 두께는 3 nm 정도로 7 ~ 8층으로 구성된 육방형 질화붕소 박막이 성장되었음을 확인할 수 있었다.

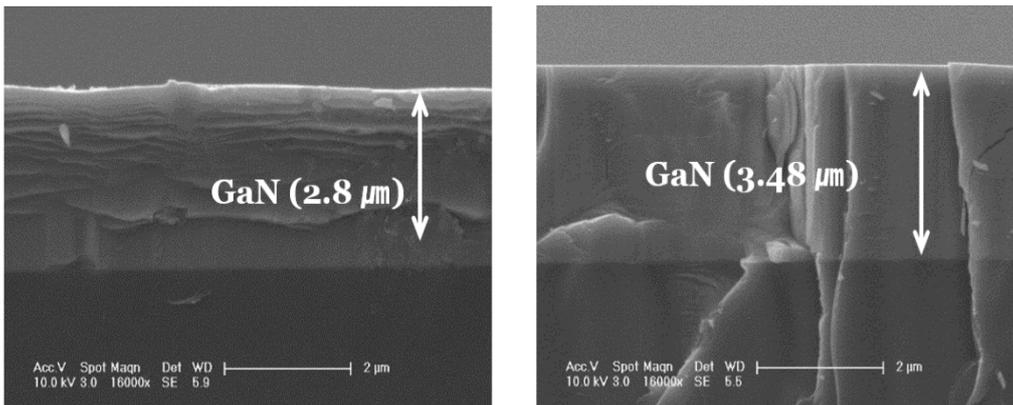


<그림 1> 사파이어 기판에 성장된 육방형 질화붕소 박막 투과전자현미경 사진.

나. AlN 버퍼층 유무에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성

표 1의 샘플 1과 샘플 2를 통하여 AlN 버퍼층 유무에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성을 비교하여 보았다. H₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막이 사용되었으며, 질화갈륨의 성장 압력은 500 Torr로 고정하였다.

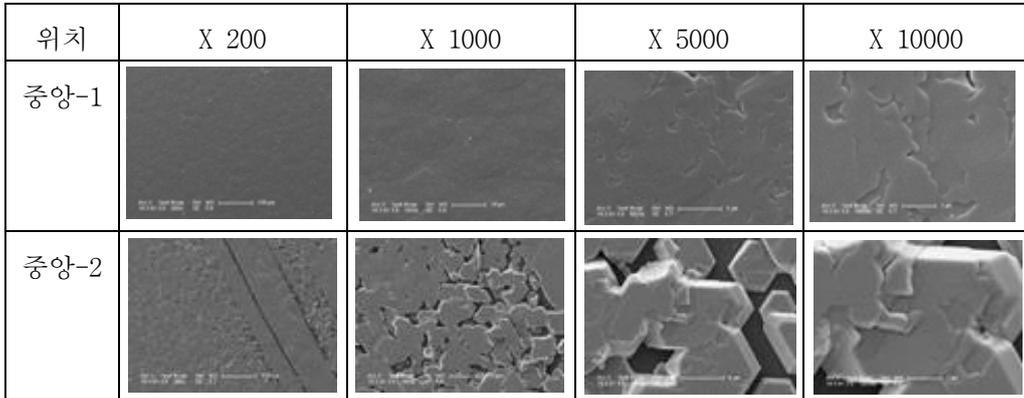
그림 2는 샘플 1 즉, AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 육방형 질화붕소 박막은 두께가 매우 얇아 주사전자현미경으로는 관찰이 어려웠으며, 성장된 질화갈륨 에피층의 두께는 위치에 따라서 편차가 컸다.



<그림 2> AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면 주사전자현미경 사진.

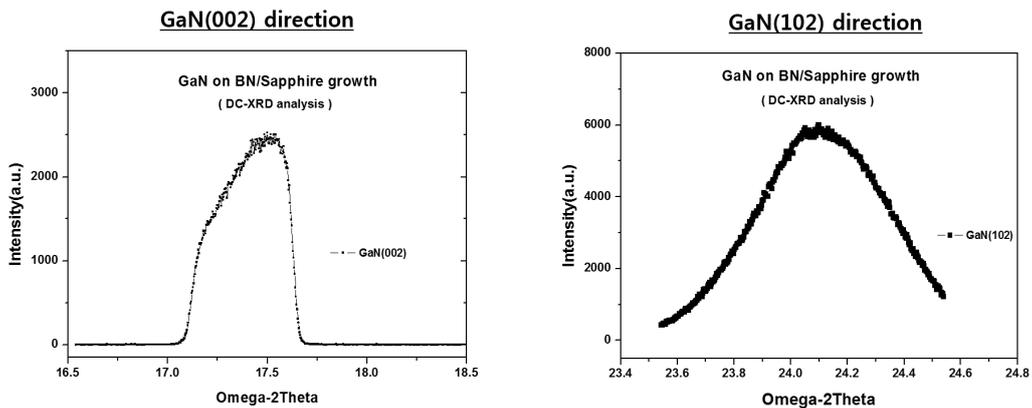
그림 3은 AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막의 표면을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 성장된 질화갈륨 에피 박막 가운데에 임의의 두 지점을 선택하여 ‘중양-1’ 과 ‘중양-2’ 로 명명하였다. ‘중양-1’ 의 경우 수평 방향 성장이 ‘중양-2’ 보다 상대적으로 많이 진행되었으나, 표면이 매우 거친 특성을 확인할 수 있었다. ‘중양-2’ 의 경우 수평 방향 성장보다 수직 방향 성장이 강한 특성을 나타내었으며, 고배율에서 표면이

매우 불규칙한 것을 확인할 수 있었다.



<그림 3> AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 표면 주사전자현미경 사진.

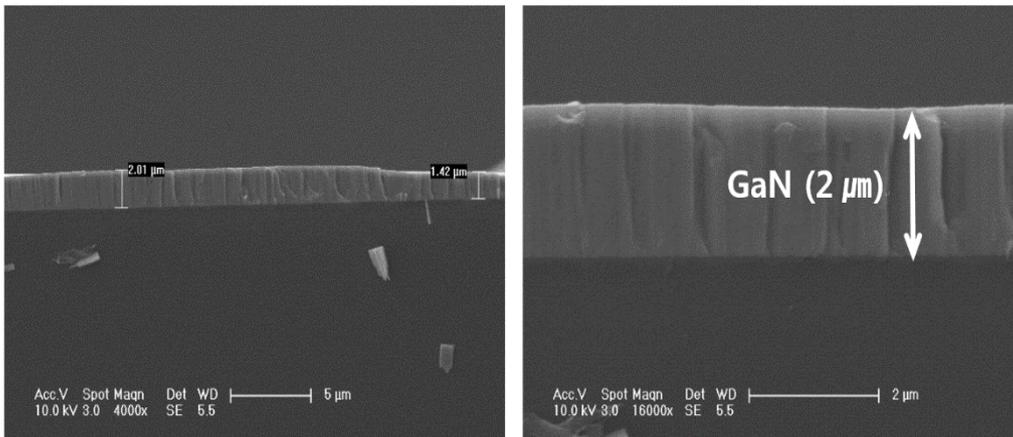
그림 4는 AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막을 X선회절분석법을 활용하여 측정된 결과이다. (002) 방향과 (102) 방향의 반치폭이 각각 1663과 1816으로 매우 크고, 강도가 매우 낮아서 질화갈륨 에피 박막의 결정성이 다결정 구조와 유사한 특성을 보임을 확인할 수 있었다.



<그림 4> AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.

그림 5는 AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막의 단면을

주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 그림 1과 비교하면 AlN 버퍼층이 적용된 경우에 질화갈륨 에피 박막의 두께가 상대적으로 얇아졌는데, 이는 성장모드의 변화에서 기인하는 것으로 생각된다. 하지만, 그림 2에서와 같이 육방형 질화붕소 박막은 확인할 수 없었다.



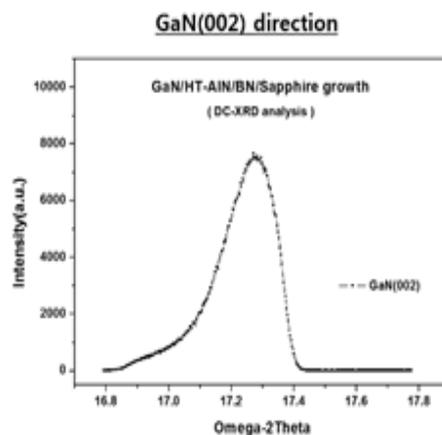
<그림 5> AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면 주사전자현미경 사진.

그림 6은 AlN 버퍼층 유무에 따른 질화갈륨 에피 박막의 표면 특성을 주사전자현미경을 통해 비교한 사진이다. AlN 버퍼층의 유무에 따라서 질화갈륨 에피 박막의 표면 성장 형태가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막이 고배율에서 보다 평탄한 특성을 보이는 것으로 보아 AlN 버퍼층을 적용하면 보다 양호한 수평 방향 성장 특성을 보임을 알 수 있었다.

위치	X 200	X 1000	X 5000	X 10000
AlN 없음 (중앙-1)				
AlN 있음				

<그림 6> AlN 버퍼층 유무에 따른 질화갈륨 에피 박막 표면 주사전자현미경 사진.

그림 7은 AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 특성을 X선회절분석법을 사용하여 측정한 결과이다. AlN 버퍼층 없이 성장된 질화갈륨 에피 박막에 비해서 강도가 많이 증가하였으며: (002) 방향에서 2500에서 8000으로 증가하였음, 반치폭도 (002) 방향에서 727로 줄어들어 결정성이 개선되었다. 하지만, (102) 방향에 대해서는 알 수 없는 이유로 인하여 측정이 되지 않았다. 이를 통해서 고품질의 질화갈륨 에피 박막을 육방형 질화붕소 박막 위에 성장시키기 위해서는 AlN 버퍼층이 적용되어야 한다는 결과를 얻을 수 있었다.

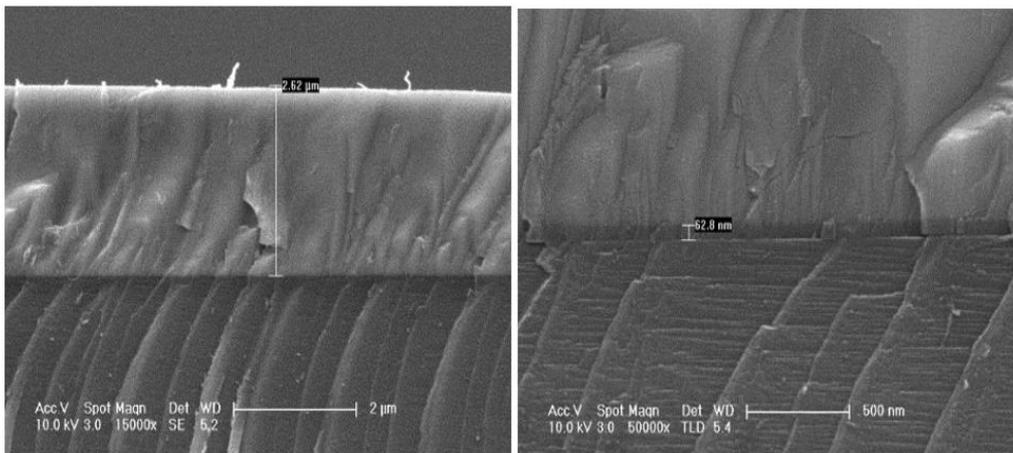


<그림 7> AlN 버퍼층 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.

다. 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 에피 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성

육방형 질화붕소 박막 성장 분위기에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성을 연구하기 위해서 H_2 분위기와 N_2 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 위에 질화갈륨 에피 박막을 성장시켰다. 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 에피 박막 성장 조건은 표 1의 샘플 2 와 샘플 3과 같다. 즉, 서로 다른 성장 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 위에 AlN 버퍼층을 형성시키고 그 위에 질화갈륨 에피 박막을 성장시켰으며, 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기를 제외한 나머지 박막 성장 조건은 동일하게 하였다.

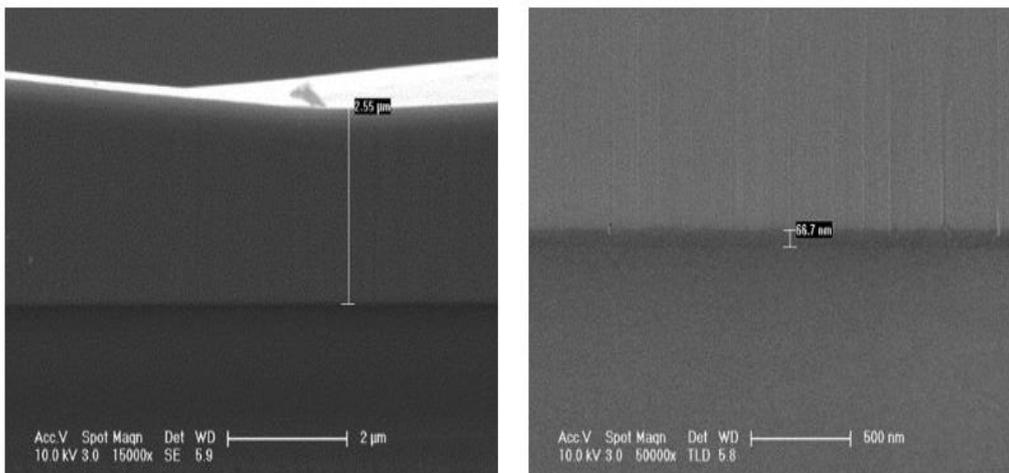
그림 8은 N_2 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막의 주사전자현미경 단면 사진이다. 고배율 사진에서 볼 수 있는 것과 같이 N_2 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막을 사용하였을 경우 AlN 버퍼층의 두께가 63 nm로 측정되었으며, 질화갈륨 에피 박막의 두께는 2.6 μm 로 확인되었다.



<그림8> N_2 분위기에서 성장된 질화붕소 박막 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막 표면 주사전자현미경 사진. AlN 버퍼층이 적용되었음.

질화갈륨 에피 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 특성을 비교해 보기 위해서 질화갈륨 에피 박막의 성장 압력을 100 Torr로 낮춰서 성장시켜 보았다(표 1의 샘플 4). 표 1의 샘플 3과의 비교를 위해서 N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막을 사용하여 질화갈륨 에피 박막을 성장시켰으며, AlN 버퍼층을 적용하고 질화갈륨의 성장 압력을 제외한 나머지 질화갈륨 에피 성장 조건은 샘플 3과 동일하게 하였다.

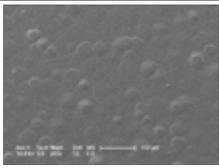
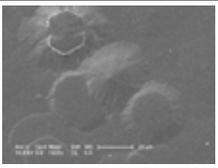
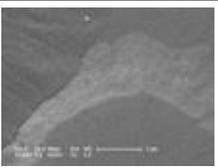
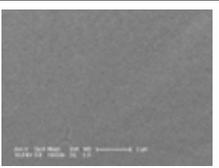
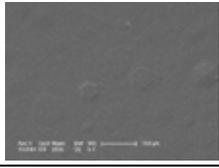
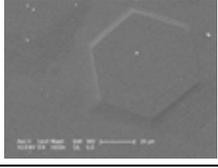
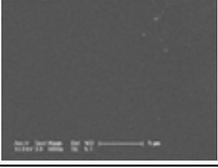
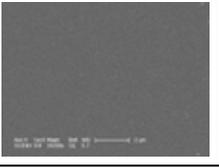
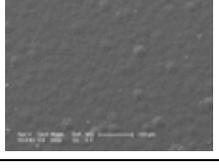
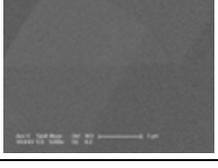
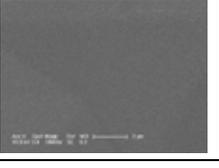
그림 9에서 볼 수 있는 것과 같이 질화갈륨 에피 박막을 100 Torr로 낮춰서 성장시킨 경우에 AlN 버퍼층의 두께는 67 nm로 측정되어 샘플 3에서와 크게 차이가 없었다. 하지만 질화갈륨 에피 박막의 두께는 2.5 ~ 3.3 μm 범위에서 편차가 있었다.



<그림9> 낮은 질화갈륨 성장 압력(100 Torr)에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 단면 주사전자현미경 사진. N₂ 분위기에서 성장된 질화붕소 박막이 사용되었으며, AlN 버퍼층이 적용되었음.

그림 10은 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기와 질화갈륨 에피 박막 성장

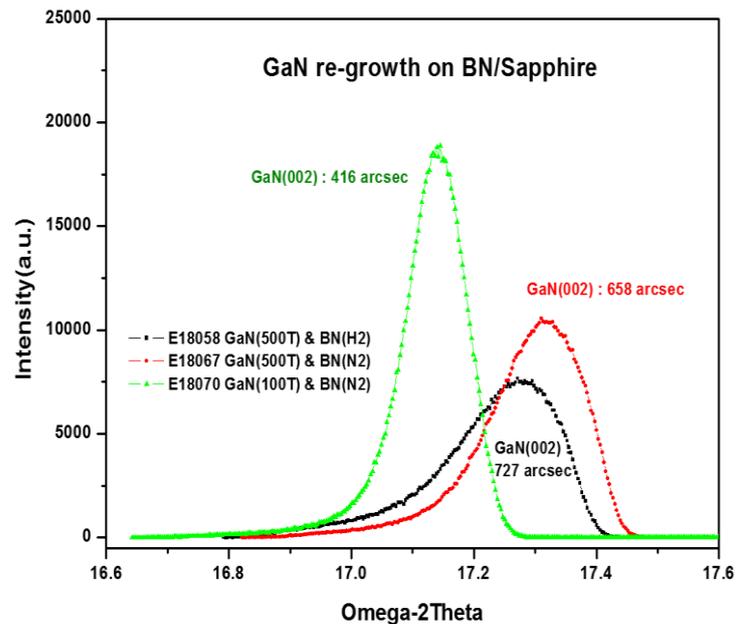
압력에 따른 질화갈륨 에피 박막의 표면 특성을 주사전자현미경을 사용하여 분석한 결과이다. 우선, H₂ 분위기와 N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막에 따른 질화갈륨 에피 박막의 표면 특성을 비교해 보면 N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막을 사용한 경우 질화갈륨 에피 박막의 그레인 크기가 보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한, 500 Torr의 질화갈륨 에피 성장 압력과 비교하여 100 Torr에서 질화갈륨 에피를 성장시킨 경우 질화갈륨 에피 박막의 그레인이 상대적으로 평탄하고 그 수가 적은 특성을 확인할 수 있었다.

위치	X 200	X 1000	X 5000	X 10000
표1의 샘플 2				
표1의 샘플 3				
표1의 샘플 4				

<그림10> 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 표면 주사현미경 사진.

그림 11은 육방형 질화붕소 박막의 성장 분위기와 질화갈륨 에피 박막 성장 압력에 대한 질화갈륨 에피 박막 특성을 X선회절분석법을 사용하여 분석, 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 H₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막을 사용한 경우 보다 N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소

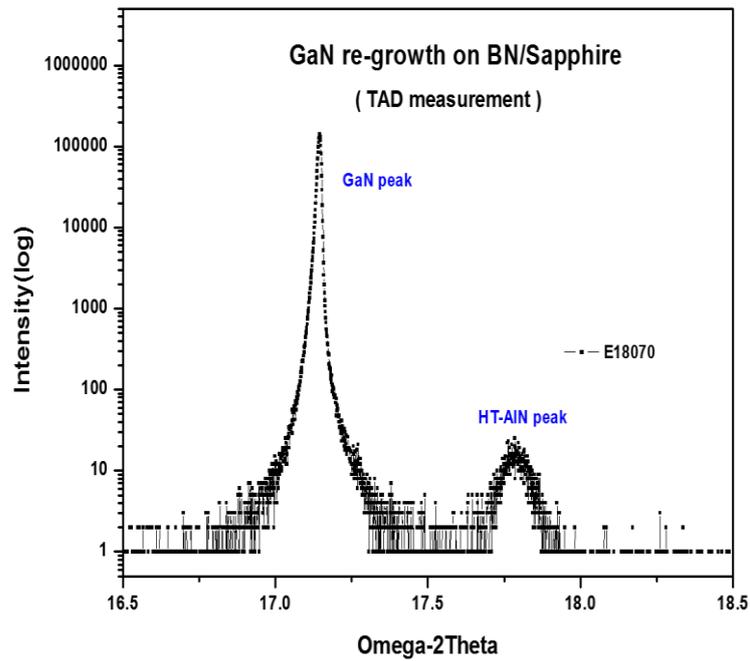
박막을 사용하여 질화갈륨 에피 박막을 성장한 경우에 반치폭이 줄어들고 강도가 높아져, 결정성이 개선되었다. 따라서, 보다 양호한 결정성을 가지는 질화갈륨 에피 박막을 획득하기 위해서는 N_2 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막을 사용하는 것이 좋다는 결과를 얻었다. 질화갈륨 에피 박막 성장 압력에 대한 질화갈륨 에피 박막의 결정성을 비교해 보면, 낮은 압력 즉, 100 Torr에서 성장된 질화갈륨 에피 박막에서 500 Torr에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 보다 적은 반치폭과 2배 높은 강도를 획득하여 낮은 압력에서 질화갈륨 에피 박막을 성장하는 것이 결정성 향상에 도움이 됨을 알 수 있었다.



<그림11> 육방형 질화붕소 박막 성장 분위기 및 질화갈륨 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.

그림 12는 표 1의 샘플 4 즉, N_2 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막

위에 AlN 버퍼층을 성장시키고 100 Torr 압력에서 질화갈륨 에피 박막을 성장시킨 경우의 X선회절분석 결과이다. 질화갈륨 에피 박막 뿐만 아니라, AlN 버퍼층에 해당하는 피크(peak)가 동시에 측정되었다. 이는 성장된 질화갈륨 에피 박막의 결정성이 우수한 것을 판단할 수 있는 근거이다.

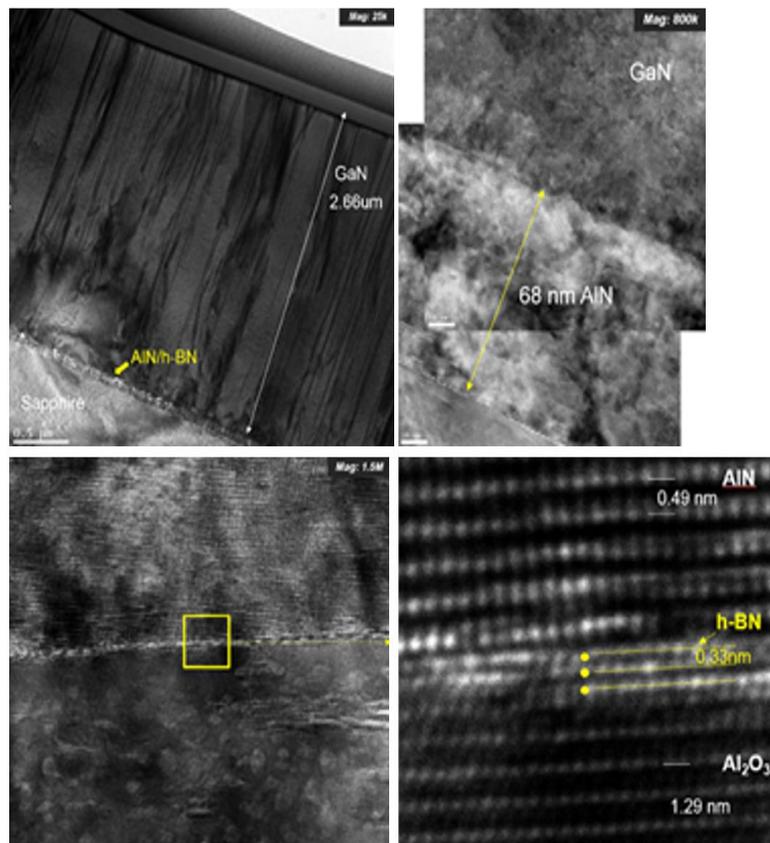


<그림12> N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, AlN 버퍼층 적용, 100 Torr 성장 압력에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 X선회절분석 결과.

표 2는 표 1의 질화갈륨 에피 박막 성장 조건에 따라 성장된 질화갈륨 에피 박막을 X선회절분석법으로 측정된 반치폭을 정리한 것이다.

<표 2> 질화갈륨 에피 박막 성장 조건에 따른 X선회절 반치폭.

표 1의 샘플 번호	X선회절분석 결과	
	(002) 방향 (arcsec)	(102) 방향 (arcsec)
1	1663	1816
2	727	-
3	658	-
4	416	900



<그림13> N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, AlN 버퍼층 적용, 100 Torr 성장 압력에서 성장된 질화갈륨 에피 박막 투과전자현미경 사진.

그림 13은 표 1의 샘플 4 즉, N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 위에 AlN 버퍼층을 성장시키고 100 Torr 압력에서 질화갈륨 에피 박막을 성장시킨 샘플을 투과전자현미경으로 분석한 사진이다. 그림 1에서와 동일하게 포항공과대학교 김종규 교수 연구실에서 분석하였다. 육방형 질화붕소 박막 위에 AlN 버퍼층과 질화갈륨 에피 박막이 순차적으로 성장되었음을 확인할 수 있었다. 육방형 질화붕소 박막은 3 ~ 4층 정도 남아있었으며, AlN 버퍼층의 두께는 주사전자현미경에서 측정된 두께와 거의 유사하게 68 nm 두께로 성장되었음을 알 수 있다. 그리고 AlN 버퍼층위에 질화갈륨 에피 박막이 2.66 μm 두께로 성장되었음을 확인하였다.

라. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발 요약

육방형 질화붕소 박막의 성장 분위기, AlN 버퍼층의 유무, 질화갈륨 에피 박막 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막의 특성을 주사전자현미경, X선회절분석법, 투과전자현미경을 사용하여 분석하였다. H₂ 보다는 N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, AlN 버퍼층 적용, 낮은 질화갈륨 에피 박막 성장 압력 조건에서 질화갈륨 에피 박막의 표면 특성이 양호하고 결정성이 우수하였다. 투과전자현미경 분석을 통해서 육방형 질화붕소 박막위에 순차적으로 AlN 버퍼층, 질화갈륨 에피 박막이 성장되었음을 확인할 수 있었다.

2. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발

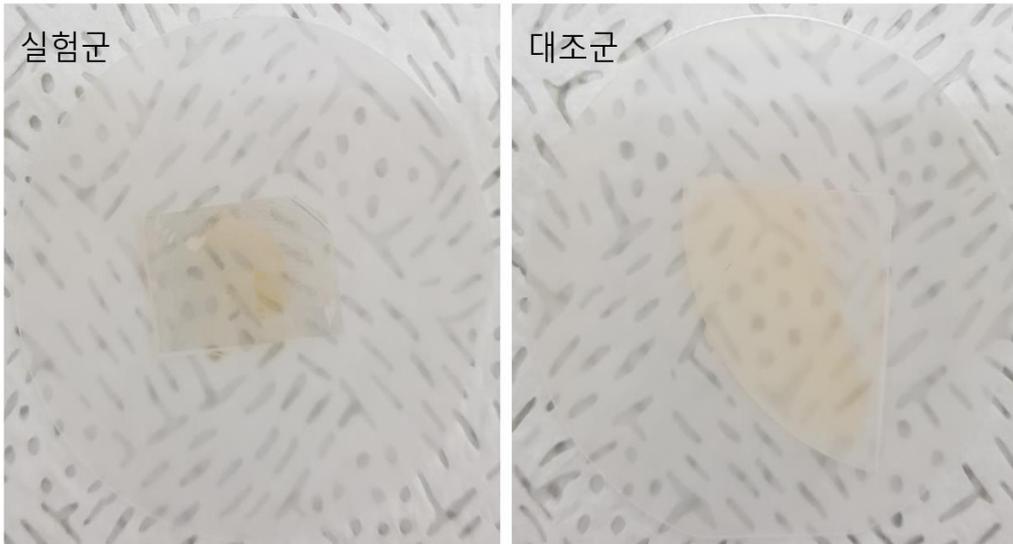
표 1의 샘플 4를 사용하여 육방형 질화붕소 박막을 희생층으로 사용한 사파이어 기판과 질화갈륨 에피 박막 분리 실험을 진행하였다. 육방형 질화붕소 박막 성장 및 육방형 질화붕소 박막을 희생층으로 활용하여 질화갈륨

에피 박막 분리 실험을 진행한 경험이 있는 전문가들의 의견은 대면적의 질화갈륨 에피 박막을 안정적으로 분리하기 위해서는 먼저 습식 식각을 활용하여 분리될 위치의 육방형 질화붕소 박막 일부를 식각하고 물리적인 힘을 인가하면 물리적인 힘이 육방형 질화붕소 박막에 보다 강하게 인가되어 쉽고 안정적으로 기판과 질화갈륨 에피 박막을 분리할 수 있을 것이라는 의견에 따라 화학적 리프트-오프(Lift-Off) 방법과 물리적인 힘을 사용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험을 진행하였다.

가. 화학적 리프트-오프를 활용한 질화갈륨 에피 박막 분리

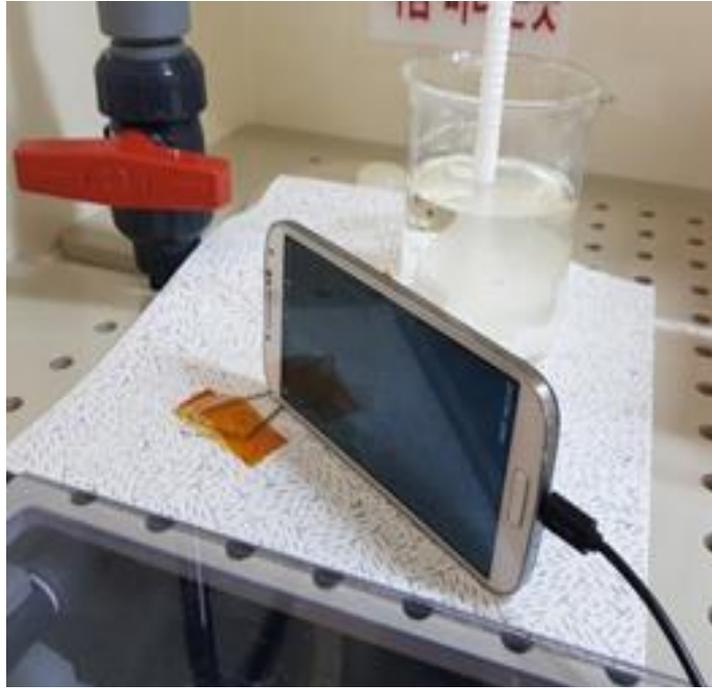
사파이어 기판 위에 성장된 육방형 질화붕소 박막을 알루미늄 에천트(etchant)에 담그면 알루미늄 에천트가 사파이어 기판과 육방형 질화붕소 박막 사이에 침투하여 사파이어 기판과 육방형 질화붕소 박막을 분리할 수 있다는 보고[7]에 따라서 알루미늄 에천트를 사용한 화학적 리프트-오프 실험을 진행하였다.

육방형 질화붕소 박막위에 성장된 질화갈륨 에피 박막에 포토레지스트(Photo-Resist, AZ4330)를 도포하고, 포토레지스트를 접합 물질로 사용하여 2인치 사파이어 기판과 접합시켰다. 접합 후 포토레지스트 내부에 남아있는 용매(solvent)를 제거하기 위해서 110도에서 3분간 가열하였다. 대조군으로 2인치 사파이어 기판을 4등분한 조각을 실험군과 동일한 방법으로 사파이어 기판과 접합시켰다. 이렇게 준비된 두 샘플을 알루미늄 에천트에 담그고 실제로 사파이어 기판과 육방형 질화붕소 박막 사이에서의 습식 식각에 의해 기판과 질화갈륨 박막이 분리되는지 확인해 보았다. 그림 14는 화학적 리프트-오프 실험을 위해서 준비된 샘플들의 사진이고, 그림 15은 이렇게 준비된 샘플들을 알루미늄 에천트에 담근 사진이다.



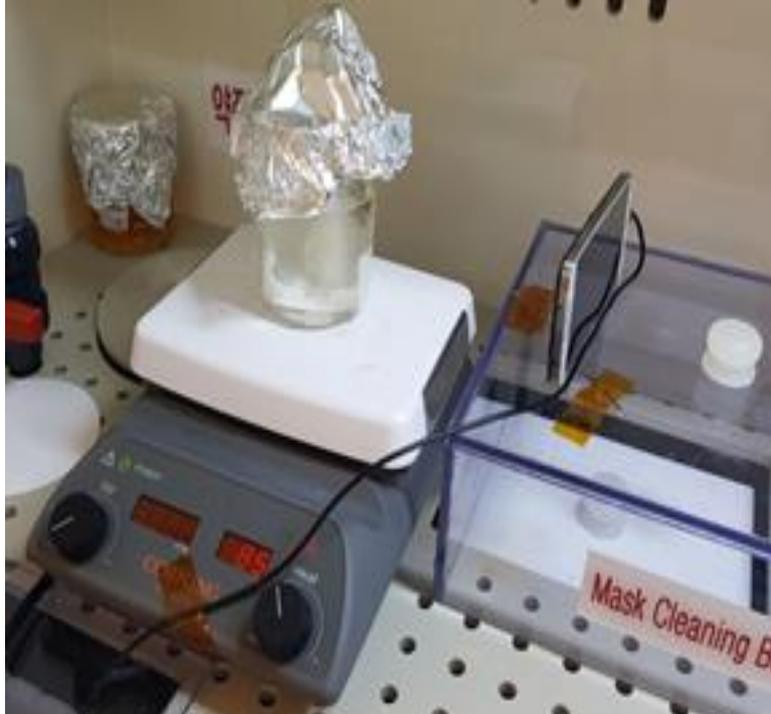
<그림14> 화학적 리프트-오프 실험을 위해 준비된 실험군과 대조군 샘플 사진.

그림 15에서 비이커 앞에 거치되어 있는 휴대폰은 1분에 한 장씩 사진을 찍도록 하여 알루미늄 에천트에 담근 후 얼마 만에 기판과 질화갈륨 에피 박막이 분리되는지 확인하는 용도로 사용하였다. 보고된 문헌상에는 2인치 사파이어 기판에 성장된 육방형 질화붕소 박막이 10분 이내에 알루미늄 에천트에 의해서 분리된다고 하였다. 그러나 68시간 동안 실험군과 대조군이 알루미늄 에천트에 담긴 상태로 보관하였으나 기판과 질화갈륨 에피 박막은 분리되지 않았다.



<그림15> 화학적 리프트-오프를 위해 실험군과 대조군을 알루미늄 에천트에 담근 사진.

알루미늄 에천트의 온도를 높이면 습식 식각률이 높아지거나, 대류 현상으로 인하여 알루미늄 에천트가 기관과 육방형 질화붕소 박막 계면에 보다 쉽게 침투하여 기관과 질화갈륨 에피 박막이 좀 더 쉽게 분리될 것이라는 예상을 통해 그림 14에서 준비된 실험군과 대조군을 알루미늄 에천트에 담그고 85도로 가열하여 보았다. 그림 16은 85도로 가열된 알루미늄 에천트에 실험군과 대조군을 담근 사진이다. 알루미늄 에천트를 85도로 가열하고 실험군과 대조군이 담긴 상태로 3시간 동안 보관하였으나 사파이어 기관과 질화갈륨 에피 박막은 분리되지 않았다.



<그림16> 화학적 리프트-오프를 위해 실험군과 대조군을 85도로 가열된 알루미늄 에천트에 담긴 사진.

나. 물리적인 힘을 활용한 질화갈륨 에피 박막 분리

육방형 질화붕소 박막의 층과 층은 약한 반데르발스력(Van der Waals force)으로 접합되어 있어 물리적인 힘에 의해서 육방형 질화붕소 박막의 층과 층을 분리하는 것이 가능하다는 보고가 있다[8]. 이에 따라서 물리적인 힘을 육방형 질화붕소 박막에 인가하여 기관과 질화갈륨 에피 박막을 분리하는 실험을 진행하였다.

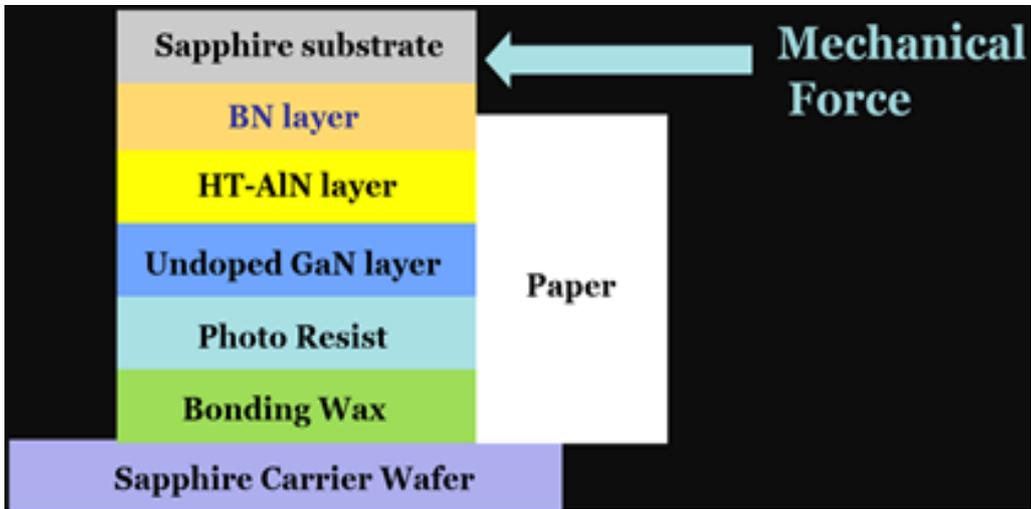
육방형 질화붕소 박막 위에 성장된 질화갈륨 에피 박막에 포토레지스트(: PMMA)를 4회 코팅하였다. 이때 포토레지스트 코팅과 용매 제거를 위한 소프트 베이킹(190도, 2분)을 번갈아 실행하였다. 4회 코팅 완료 시 코팅된 전체

포토레지스트의 두께는 약 10 μm 로 측정되었다. 포토레지스트위에 기관 본딩용 고온 왁스를 도포하여 2인치 사파이어 기관과 접합하였다. 그림 17은 이렇게 준비된 샘플의 사진이다.



<그림17> 물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험을 위해 준비된 샘플 사진.

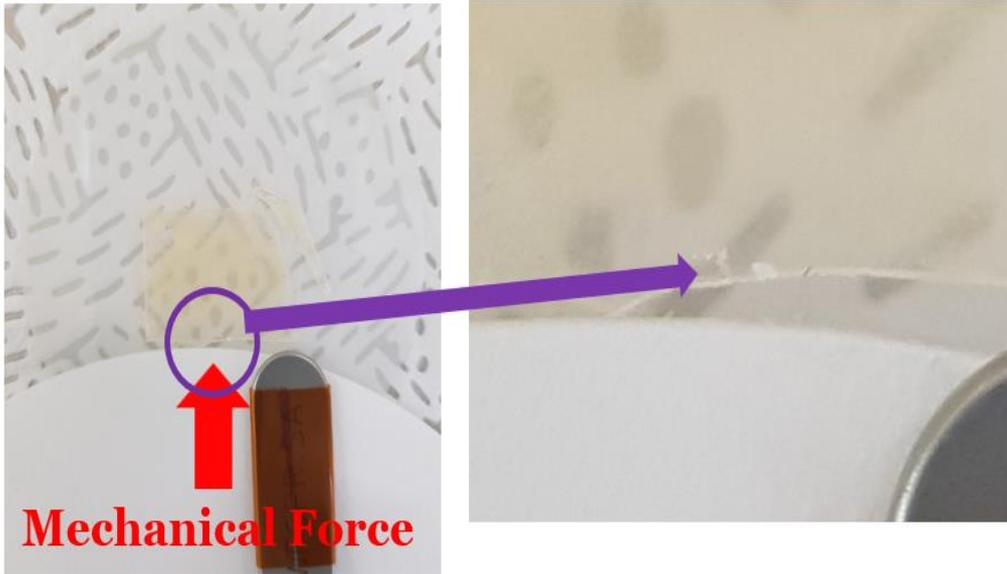
이렇게 준비된 샘플을 실험실에서 사용하는 트위저를 사용하여 수평방향으로 힘을 인가하여 기관과 질화갈륨 에피 박막을 분리하고자 하였다. 수평방향으로 힘을 인가할 때 힘이 기관 본딩용 왁스 보다 육방형 질화붕소 박막에 보다 강하게 인가되도록 하기 위해서 그림 18과 같이 실험실에서 사용하는 무진 종이를 3장 겹쳐서 올리고 종이 위에서 수평방향의 힘이 인가되도록 하였다.



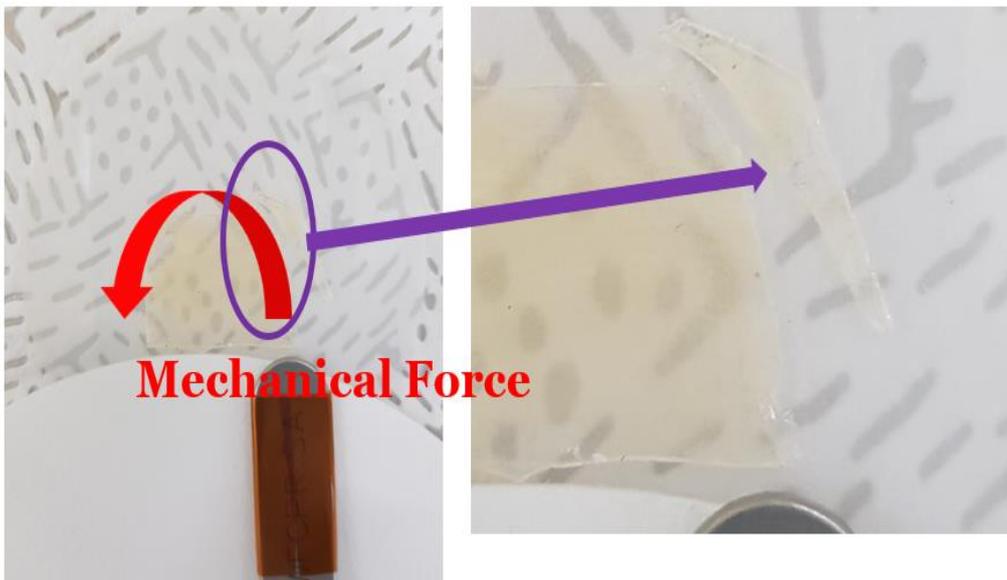
<그림18> 물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험 셋업(setup).

그림 17에서 준비된 샘플을 그림 19에서 보이는 것과 같이 샘플의 가운데에 트위저를 이용하여 수평방향으로 물리적인 힘을 인가하였다. 그림 19의 오른쪽 확대한 사진에서 보이는 것과 같이 기판과 질화갈륨 에피 박막이 분리되기 전에 사파이어 기판이 깨져나가 기판과 질화갈륨 에피 박막을 분리할 수 없었다.

수평방향으로 물리적인 힘을 인가할 때 그림 17과 같이 준비된 샘플의 가장자리에 힘을 인가하면 육방형 질화붕소 박막에 뒤틀리는 힘이 강하게 인가되어 기판과 질화갈륨 에피층을 분리할 수 있을 것이라 예상하고, 그림 20에서 보이는 것과 같이 샘플의 가장자리에 트위저로 물리적인 힘을 인가하여 보았다. 그림 20의 오른쪽 사진에 보이는 것과 같이 예상과 다르게 샘플이 깨져서 떨어져 나갔다. 떨어져 나간 샘플의 뒷면에는 기판 본딩용 왁스가 묻어있어 육방형 질화붕소 박막의 층과 층 사이에서 분리가 발생하지 않았으며, 2인치 사파이어 기판의 본딩 계면에서 질화갈륨 에피 박막이 떨어져 나갔음을 확인하였다.



<그림19> 물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험.
 샘플 중앙에 물리적인 힘을 인가.



<그림20> 물리적인 힘을 이용한 질화갈륨 에피 박막 분리 실험.
 샘플 가장자리에 물리적인 힘을 인가.

다. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발 요약

문헌상에 소개된 화학적 리프트-오프와 물리적인 힘을 이용한 기판과 질화갈륨 에피 박막의 분리 실험을 진행하였다. 화학적 리프트-오프 방식에서는 육방형 질화붕소 박막을 습식 식각하는 것이 어려웠으며, 물리적인 힘을 활용한 기판 분리 실험에 있어서는 육방형 질화붕소 박막이 아닌 기판 본딩용 왁스 계면에서 질화갈륨 에피 박막이 떨어져 나감을 확인하였다.

3. 고방열 기판과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술 개발

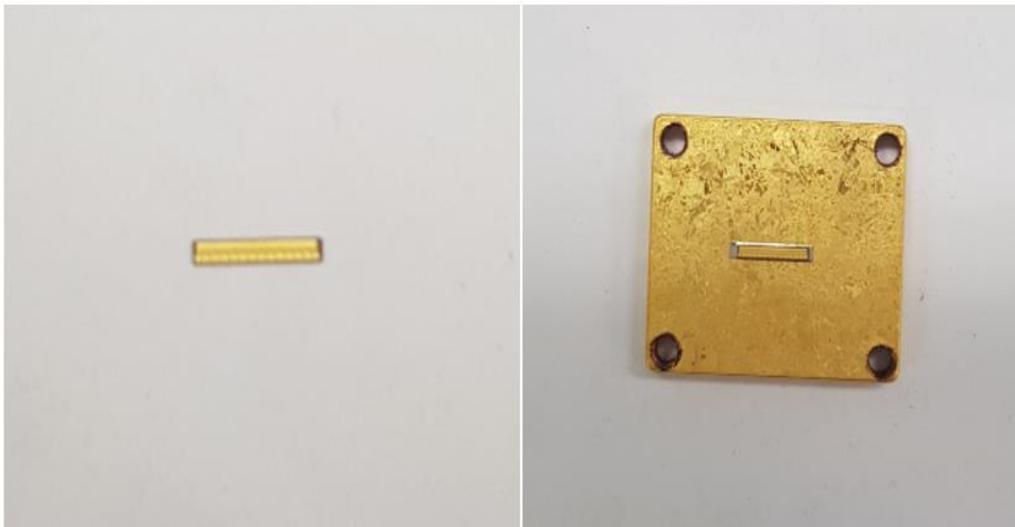
고주파 동작 시 발생하는 열로 인한 소자의 성능 및 신뢰성 저하를 개선하기 위해서 질화갈륨 기반 고주파 소자를 고방열 기판과 접합하여 동작시켜야 한다. 이를 위해서 제작된 질화갈륨 기반 고주파 소자를 방열 성능이 우수한 구리 기판에 접합하고, 기판의 온도 및 소자의 출력 전력에 따른 고주파 소자에서의 발열을 측정해 보았다.

실험에 사용된 질화갈륨 기반 고주파 소자는 한국전자통신연구소(RF/전력부품연구그룹)에서 제작된 질화갈륨 기반 고풍력-고주파 소자이다. 질화갈륨 기반 고주파 소자는 게이트 길이 500 nm, 게이트 폭 200 nm로 제작되었다. 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작에는 탄화규소 기판이 사용되었고, 멀티-핑거(Multi-Finger) 구조가 적용되어 전체 게이트 폭은 26 mm이다.

가. 질화갈륨 기반 고주파 소자와 구리 기판 접합

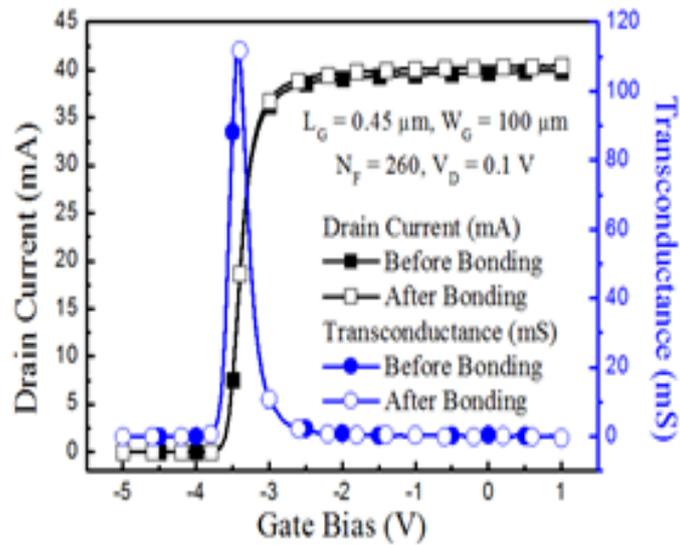
질화갈륨 기반 고주파 소자는 제작이 완료된 후에 다이싱(dicing) 공정을

통해서 단일 소자로 분리되었다. 분리된 고주파 소자의 아랫면에 골드틴(AuSn)을 도포하고 열과 압력을 인가하여 구리 기판과 접합하였다. 그림 21은 다이싱이 완료된 질화갈륨 기반 고주파 소자와 구리 기판에 접합된 고주파 소자의 사진이다.



<그림19> 다이싱이 완료된 질화갈륨 기반 고주파 소자와 구리 기판에 접합된 질화갈륨 기반 고주파 소자 사진.

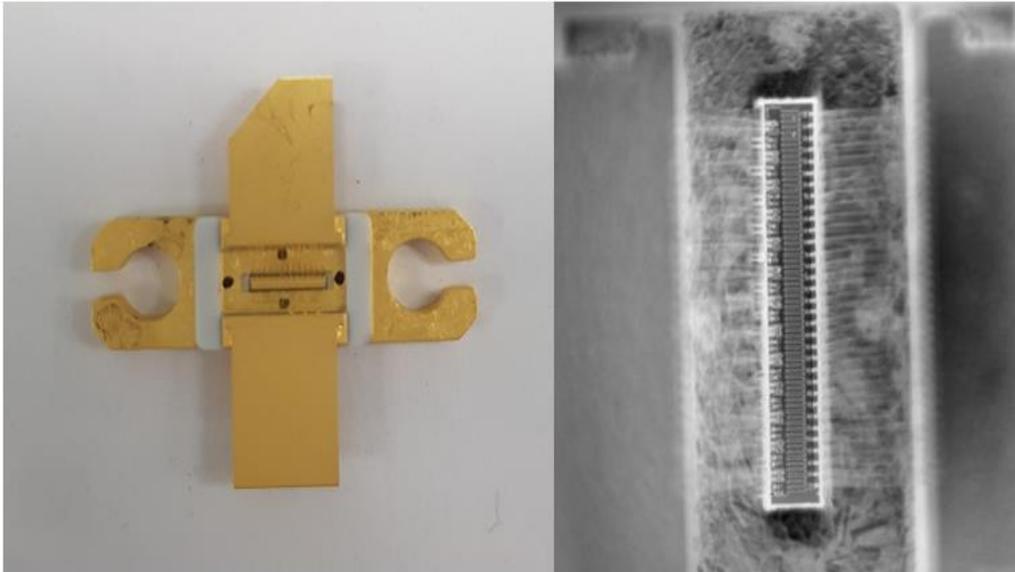
그림 22는 구리 기판과 접합하기 전과 후의 소자 전달 특성을 측정한 결과이다. 드레인 전압을 0.1 V로 고정하고 게이트 전압을 -5 V에서 1 V까지 스위프(sweep)하여 드레인 전류를 측정하였다. 전달특성은 게이트 전압의 변화량에 대한 드레인 전류의 변화량으로 정의된다. 전달특성이 좋을수록 소자의 전력증폭효율이 좋음을 나타낸다. 따라서 소자의 전달특성은 고주파 전력 증폭 소자에 있어서 중요한 동작 특성이다. 구리 기판과 접합하기 전과 후의 소자 성능 즉, 드레인 전류와 전달특성은 변화가 없었다. 이는 구리 기판과의 접합으로 인한 소자의 성능 저하가 없음을 의미한다.



<그림20> 구리 기판과 접합하기 전과 후의 질화갈륨 기반 고주파 소자 전달 특성.

나. 구리 기판 온도에 따른 질화갈륨 기반 고주파 소자의 발열 특성

구리 기판에 접합된 고주파 소자의 기판 온도에 따른 발열 특성이 측정되었다. 그림 23은 발열 측정을 위해 패키지(package)가 완료된 질화갈륨 기반 고주파 소자의 사진이다. 측정 장비와의 호환성을 위해서 그림 21과 다른 형태로 패키지를 진행하였으나, 다이싱이 완료된 고주파 소자와 그림 23의 기판과의 접합은 그림 21에서와 동일하게 진행하였다.

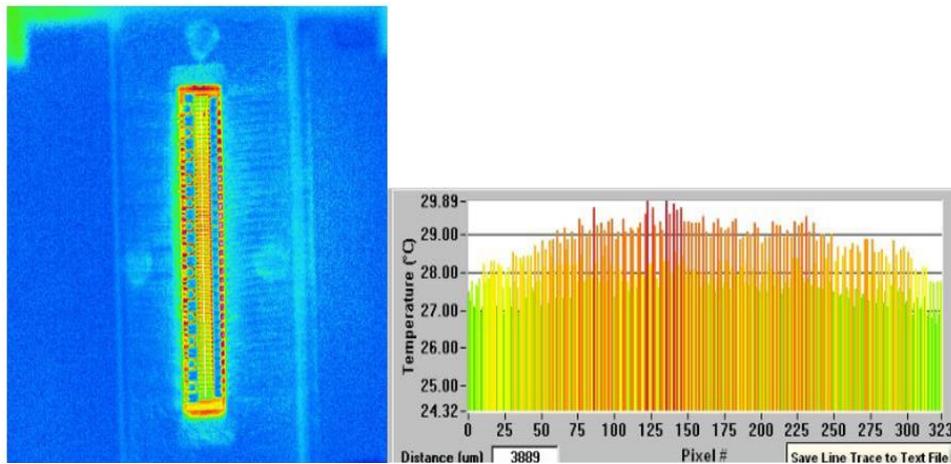


<그림21> 소자에서의 발열 측정을 위해서 패키징된 질화갈륨 기반 고주파 소자 사진.

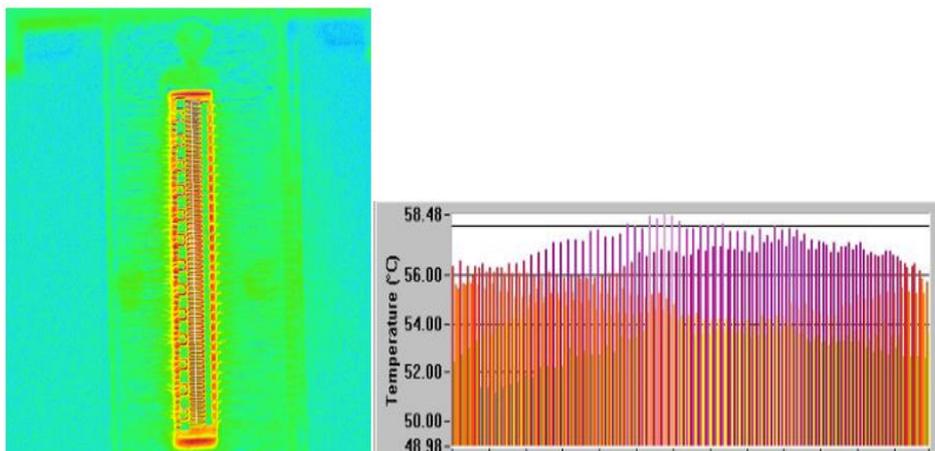
질화갈륨 기반 고주파 소자를 사용한 발열 측정은 상온 즉, 기판온도가 25도인 경우에 드레인 전압을 10 V로 고정하고 게이트 전압(-3.279 V)을 조절하여 출력 전류가 400 mA가 되는 조건을 기준으로 하여, 기판 온도가 50도, 85도 인 경우에도 동일한 바이어스 전압을 인가하여 측정하였다. 기판 온도를 50도, 85도로 상승시키면 출력 전류가 각각 399 mA와 388 mA로 감소하였다. 이는 기판 온도의 상승에 따라서 소자 내부 온도가 같이 상승하여 출력 전력이 감소하였기 때문이다. 질화갈륨 기반의 고주파 소자 동작 시 발생하는 열은 적외선 열화상 카메라로 측정하였다.

그림 24, 25, 그리고 26은 각각 기판 온도가 25도, 50도, 그리고 85도 일 때 질화갈륨 기반 고주파 소자의 발열을 측정한 결과이다. 각 그림의 오른쪽은 왼쪽 그림에서 보이는 흰색선 즉, 게이트 영역에서 발생하는 열을 보다 자세히 수치로 나타낸 것이다. 기판의 온도가 올라갈수록 소자의 발열

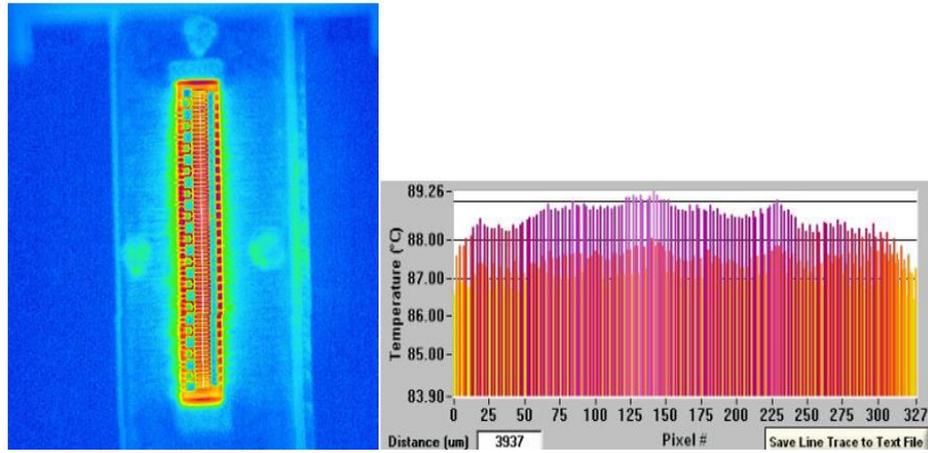
및 소자 내부의 온도가 상승하였음을 알 수 있었다. 이는 기판의 온도가 소자의 동작 온도 및 내부 발열 특성에 있어서 중요한 역할을 한다는 것을 의미함과 동시에 기판을 통한 소자의 열방출이 고주파 소자의 동작에 있어서 매우 중요한 요소임을 나타낸다.



<그림22> 기판 온도 25도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.

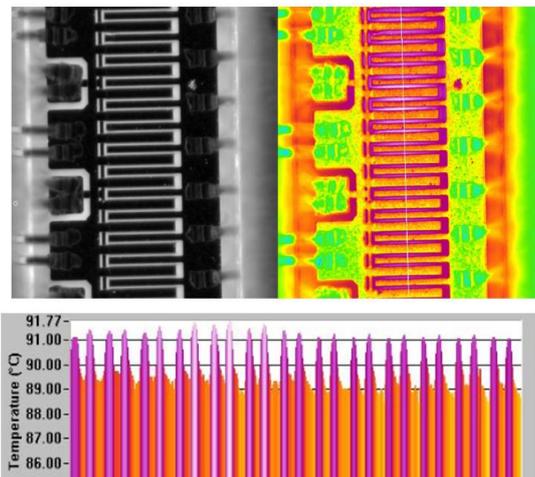


<그림23> 기판 온도 50도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.



<그림24> 기판 온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V에서의
 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.

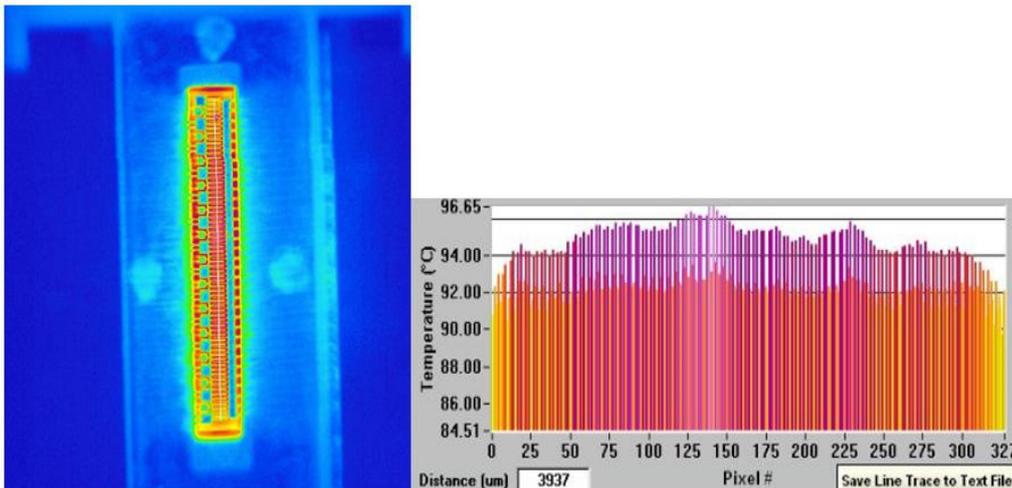
그림 27은 그림 26에서 열이 가장 많이 나는 부분을 확대하여 측정한
 결과이다. 소자의 게이트 영역에서 가장 높은 열이 발생함을 확인할 수
 있었다.



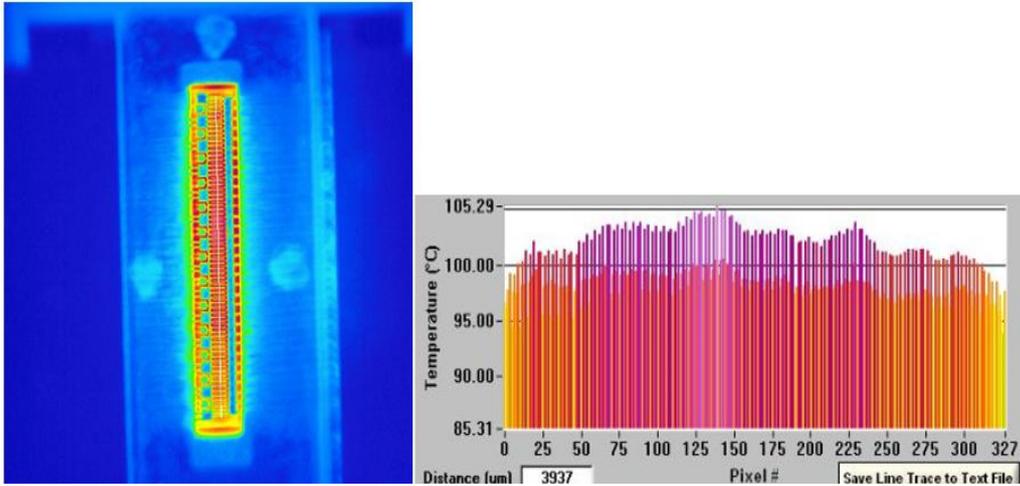
<그림25> 기판 온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 10 V에서의
 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과 (15배율로 확대하여 측정한 사진).

다. 출력 전력에 따른 질화갈륨 기반 고주파 소자의 발열 특성

질화갈륨 기반 고주파 소자에서 출력 전압을 증가시켜 출력 전력이 상승하면 소자에서 더 높은 열이 발생하게 된다. 따라서 출력 전압의 증가에 따른 질화갈륨 기반 고주파 소자의 발열 특성을 확인하기 위해서 기판 온도는 85도, 게이트 전압은 -3.279 V로 고정하고 드레인 전압을 20 V와 30 V로 증가시키면서 소자에서의 발열을 측정하였다. 드레인 전압의 증가에 따라서 드레인 전류도 함께 증가하여, 드레인 전압이 20 V와 30 V 일 때 드레인 전류는 각각 432 mA와 464 mA로 측정되었다. 그림 28과 그림 29는 각각 드레인 전압이 20 V와 30 V인 조건에서의 발열을 측정한 사진이다. 그림 26과 함께 비교하면 소자의 출력 전압이 증가함에 따라서 고주파 소자에서의 발열이 함께 상승한 것을 확인할 수 있었다. 그림 29에서 보이는 것과 같이 소자에서의 발열이 105도 이상인 경우에도 구리 기판 및 소자의 변형은 없었다.



<그림26> 기판 온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 20 V에서의 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.



<그림27> 기판 온도 85도, 게이트 전압 -3.279 V, 드레인 전압 30 V에서의
 질화갈륨 기반 고주파 소자 발열 측정 결과.

라. 고방열 기판과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술 개발 요약

질화갈륨 기반 고주파 소자와 열방출 성능이 우수한 구리 기판을 골드틴을 도포하고 열과 압력을 인가하여 접합하였으며, 구리 기판과의 접합으로 인한 소자의 성능 저하는 없었다. 발열을 수치화하기 위한 적외선 열화상 측정이 수행되었으며, 기판의 온도 및 출력 전압의 변화에 대한 고주파 소자 발열 특성이 분석되었다. 기판의 온도가 높을수록, 소자의 출력 전압이 높을수록 고주파 소자에서 발생하는 열이 상승함을 확인하였다. 질화갈륨 기반 고주파 소자에서의 발열이 105도 이상인 환경에서도 구리 기판 및 고주파 소자의 변형이 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

제3절. 당해 연구 결과 최적화

1. 고주파용 질화갈륨 에피 성장 기술 개발

육방형 질화붕소 박막위에 성장된 질화갈륨 에피 박막의 X선회절분석 결과에서 확인한 것과 같이 상당히 우수한 결정질의 고주파용 질화갈륨 에피 박막을 획득할 수 있었다. 하지만, 아직 상용 질화갈륨 에피 박막에는 조금 모자란 상태이다. 따라서 현재 (002) 방향에서의 최소 반치폭인 416을 AlN 버퍼층의 두께 조절 및 질화갈륨 성장 조건을 최적화하여 350이하로 줄이는 연구가 진행되어야 한다.

2. 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발

육방형 질화붕소 박막을 분리층으로 사용할 때 현재까지 문헌으로 보고된 방법들을 사용하여서는 기판과 고주파 소자를 분리하는 것이 어려웠다. 그 원인으로는 그림 1과 그림 13의 비교에서 알 수 있듯이 육방형 질화붕소 박막위에 질화갈륨 에피 박막을 성장시키면 육방형 질화붕소 박막의 두께가 얇아졌다. 이는 질화갈륨 에피 박막의 성장으로 인하여 기존 육방형 질화붕소 박막이 일부 소실되었기 때문이다. 따라서 보다 두꺼운 육방형 질화붕소 박막을 사용한 질화갈륨 에피 박막 성장을 통해 질화갈륨 에피 박막 성장 후에도 기판과 질화갈륨 에피 박막의 분리에 충분한 두께의 육방형 질화붕소 박막이 남아있도록 육방형 질화붕소 박막의 두께를 최적화 하여야 한다.

제 3 장. 최종 연구개발 결과 파급효과

제 3 장. 최종 연구개발 결과 파급효과

제1절. 미래 연구 분야 선점

동작 주파수와 출력 전력이 계속적으로 증가하고 있는 송수신용 고주파 소자의 추세에 따라서 기존 실리콘 또는 갈륨비소 기반 고주파 소자 부품은 질화갈륨 기반 고주파 소자로 대체되고 있다. 그리고 질화갈륨 기반 고주파 소자의 동작 주파수와 출력 전력을 안정적으로 증가시키기 위해서 일부 선진국을 중심으로 고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작에 대한 연구를 진행하고 있으나 아직 기초 연구단계에 머물러 있다. 따라서 고방열 기관상에서 동작하는 방열성능이 향상된 질화갈륨 기반 고효율-고주파 소자 제작 기술을 개발하여 기존 선행 연구들의 단점을 극복하고 독자적인 원천기술을 확보할 수 있다.

또한, 모바일/IoT 기기는 인체공학적 편의성 증대를 위해서 유연(flexible) 기기의 형태로 진화하고 있어, 통신용 유연 고주파 소자에 대한 필요성이 증대되고 있다. 뿐만 아니라, 다양한 웨어러블 기기들의 발달과 적용 분야의 확대 역시 유연 고주파 소자에 대한 요구를 증가시키고 있다. 따라서 질화갈륨 기반 고주파 소자와 기관 분리 그리고, 분리된 고주파 소자의 유연 기관으로의 전사를 통해서 유연 질화갈륨 기반 고주파 소자 제작 기술을 선점할 수 있다.

제2절. 파급효과

기술적인 측면에 있어서 현재 일부 선진국을 중심으로 기초 연구 단계에 머물러 있는 고방열 기관상에서 동작하는 질화갈륨 기반 고주파 소자에 대한 핵심 원천기술을 한국전자통신연구원이 독자적으로 확보할 수 있다. 방열 성능 개선으로 인한 고주파 동작 특성의 향상은 대량의 정보를 빠르게 처리할 수 있는 무선 이동통신 시스템의 구현을 가속화시키고, 이를 활용한 국내 관련 기업들이 기술적 우위를 선점할 수 있도록 한다.

경제적인 측면에 있어서 질화갈륨 기반 고주파 소자 시장은 무선 이동통신 네트워크의 확대와 군수용 고주파 시스템으로의 적용으로 인하여 2022년에는 \$755.6M으로 증가할 것으로 예상된다. 가파르게 상승하고 있는 질화갈륨 기반 고주파 소자 부품 시장에서 기존 기술의 한계를 극복할 수 있는 핵심기술을 자체적으로 확보함으로써 인하여 국내 고주파 부품 시장의 국가 경쟁력을 향상시킬 수 있다. 또한 동작 성능이 향상된 질화갈륨 기반 고주파 소자는 이동통신 기지국, 자동차, 고성능 레이더, 고온 센싱 시스템 등 여러 분야에 응용이 가능하여 생활, 국방, 안전과 관련된 부품 산업의 성장과 새로운 신규 고용 창출에 결정적 기여를 할 것으로 예상된다.

제 4 장. 결 론

제 4 장. 결 론

“질화붕소 분리층과 소자 전사 기술을 이용한 다목적 초고주파 소자 개발” 과제 수행을 통해서 고방열 기관상에서 동작하는 다목적 고출력-고주파 소자를 제작하기 위해 제시하였던 3 가지 요소 기술들(: 고주파용 질화갈륨 기반 에피 성장기술 개발, 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 개발, 고방열 기관과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술)에 대한 연구를 진행하였으며 아래의 연구 결과를 얻었다.

고주파용 질화갈륨 기반 에피 성장기술 개발과 관련하여 육방형 질화붕소 박막의 성장 분위기, AlN 버퍼층의 유무, 질화갈륨 에피 박막 성장 압력에 따른 질화갈륨 에피 박막의 특성을 다양한 분석법을 활용하여 연구하였다. N₂ 분위기에서 성장된 육방형 질화붕소 박막 사용, AlN 버퍼층 적용, 낮은 질화갈륨 에피 박막 성장 압력 조건에서 양호한 결정성을 가지는 질화갈륨 에피 박막을 획득할 수 있으며, 육방형 질화붕소 박막위에 순차적으로 AlN 버퍼층과 질화갈륨 에피 박막이 성장되었음을 확인하였다.

육방형 질화붕소 분리층을 활용한 질화갈륨 기반 고주파 소자 분리 기술 연구에 있어서는 문헌상에 보고된 화학적 리프트-오프와 물리적인 힘을 이용한 기관과 질화붕소 에피 박막 분리 실험을 진행하였다. 그러나 기관과 질화붕소 에피 박막을 쉽게 분리해 내지 못하였다. 이는 질화갈륨 에피 박막 성장에 의해서 육방형 질화붕소 박막의 일부가 소실되었기 때문으로 확인되었다.

고방열 기관과 질화갈륨 기반 고주파 소자 접합 기술은 골드틴을 접합 물질로 사용하고 열과 압력을 동시에 인가하여 소자의 성능 저하 없이 고주파 소자와 구리 기관을 접합할 수 있었다. 또한, 열화상 측정을 통해서 기관의 온도 및 소자의 출력 전압이 높을수록 소자에서 발생하는 열이 상승함을 확인하였다. 소자에서의 발열이 105도를 넘어가는 기관 온도 및 출력 전력 환경에서도 구리

기판 및 고주파 소자의 변형이 없음을 확인하였다.

당해(1차년도) 연구 결과를 바탕으로 차년(2차년도)에는 기판과 고주파 소자를 보다 쉽게 분리해 낼 수 있는 육방형 질화붕소 박막 두께에 대한 연구, AlN 버퍼층의 두께와 질화갈륨 에피 성장 조건에 대한 미세 조정을 통한 질화갈륨 에피 박막 특성 개선에 대한 연구를 진행할 예정이며, 이렇게 획득된 고주파용 질화갈륨 에피 박막을 사용하여 실제 고방열 기판상에서 동작하는 다목적 고출력-고주파 소자를 제작할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] TFF2023-2-01 Usual Manual, Qurvo.
- [2] H. Morkoc, A. D. Carlo, and R. Cingolani, “GaN-based modulation doped FETs and UV detectors” , Solid-State Electronics, Vol. 46 (2), pp. 157-202, 2002.
- [3] Y. Zhang, J. H. Teo, T. Palacios, “Beyond thermal management: incorporating p-diamond back-barriers and cap layers into AlGaN/GaN HEMTs” , IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 63 (6), pp. 2340-2345, 2016.
- [4] R. Korenstein, S. D. Bernstein, S. J. Pereira, “Gallium nitride layer with diamond layers” , U. S. Patent, No. 7,884,373, 2011.
- [5] K. Hirama, Y. Taniyasu, and M. Kasu, “AlGaN/GaN high-electron mobility transistors with low thermal resistance grown on single-crystal diamond (111) substrates by metalorganic vapor-phase epitaxy” , Applied Physics Letters, Vol. 98, 162112, 2011.
- [6] “GaN RF device market applications, players, technology, and substrate” , Yole Development, 2016.
- [7] A-R. Jang, et al., “Wafer-Scale and Wrinkle-Free Epitaxial Growth of Single-Orientated Multilayer Hexagonal Boron Nitride on Sapphire” , Nano Letters, Vol. 16, pp. 3360-3366, 2016.
- [8] K. S. Novoselov, et al., “2D Materials and Van der Waals Heterostructures” , Science, Vol. 353(6298), 2016.

약 어 표

- IoT: Internet of Things
- 2DEG: 2-Dimensional Electron Gas
- E. L.: Export License
- MIT: Massachusetts Institute of Technology
- NTT: Nippon Telegraph and Telephone Corporation
- SEM: Scanning Electron Microscope
- XRD: X-ray Diffraction
- TEM: Transmission Electron Microscope
- MOCVD: Metalorganic Chemical Vapor Deposition
- PMMA: Poly Methylemethacrylate

기술 문서 구성 표

- 특허출원

구분	제목	국명	출원(관리)/ 등록번호	등록/출월/ 제출일자	비고
국내	반도체 소자의 제조 방법	한국	2018- 0154813	출원 (2018.12.04)	

- 기술문서

구분	제목	주요 내용	제출자	제출일시
TDP	질화갈륨 기반 HEMT 소자에서의 온도 측정 결과	기관온도 및 출력 전력에 따른 GaN 기반 HEMT 소자의 발열 측정 결과 정리	장성재	2018.12.03.
TM	육방형 질화붕소 분리층을 활용한 기관 분리 실험	화학적 리프트-오프와 물리적인 힘을 활용한 기관과 고주파 소자 분리 실험 결과 정리	장성재	2018.11.30.
TDP	XRD와 TEM을 사용한 h-BN 박막 위에 성장된 GaN 에피층 특성 분석	h-BN 위에 다양한 성장 조건에서 성장된 GaN 에피 박막 특성을 XRD와 TEM을 활용하여 분석함	장성재	2018.11.28.
TM	h-BN을 사용한 GaN 에피 성장 및 SEM 분석	h-BN 위에 다양한 성장 조건에서 성장된 GaN 에피 박막 특성을 SEM을 활용하여 분석함	장성재	2018.11.26.

주 의

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