

## 다결정 GaAs 박막의 테라헤르츠파 검출 특성 분석

백문철\* · 강광용\*\* ·

곽민환\*\* · 강승범\*\*

\*케이맥주식회사 ·

\*\*한국전자통신연구원

테라헤르츠파를 발생 및 검출하기 위하여 가장 많이 사용되는 광전도 안테나 소자에서 다결정 GaAs 박막에 대한 미세구조 및 테라헤르츠파 검출 특성에 대하여 분석하였다. 분자선 에피택시를 이용한 저온 성장 GaAs 박막의 성장 시 비정상적으로 낮은 온도에서 단결정 GaAs 박막 대신에 다결정 GaAs 박막이 성장하였다. 다결정질에 포함된 결정립계는 단결정 GaAs 박막에 있는 As-침전물과 더불어 전하의 포집자로 작용하였다. 결정 결함의 형태 및 분포에 따른 간단한 모델을 설정하여 각 GaAs 박막에서의 전하이동도를 계산을 통하여 구하였으며, 실험치와 비교했을 때에 변화 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 테라헤르츠파의 검출 특성을 분석한 결과, 다결정 GaAs 박막에서 단결정보다 높은 신호대 잡음비를 갖는 테라헤르츠파가 검출되었다.

### I. 서 론

테라헤르츠파 (terahertz wave)는 주파수 범위 0.1~10 THz 영역에 속하는 전자기파로서 전파와 광파의 중간 위치에 속한다. 이 주파수 대역은 전자공학적인 방법으로 구현하기에는 너무 짧은 파장이며, 광학적으로는 너무 긴 파장 영역으로서, 발생 및 검출을 위한 기술이 쉽지 않아 오랫동안 개발이 되지 않은 미지의 영역으로 존재하여 왔다. 최근에는 여러 분야의 눈부신 기술 발전에 따라 다양한 종류의 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술뿐만 아니라 수많은 응용 기술이 개발되어오고 있다<sup>[1]</sup>. 수 GHz에서 수 THz

영역은 유기 소재의 분자 진동, 천이, 회전 등의 주파수에 해당한다. 이에 따라 테라헤르츠파의 분광을 이용하여 미지의 물질 규명 및 분자 소재의 물리적 특성 분석이 가능하다. 또한 빛과 달리 종이, 플라스틱, 목재 등 금속과 극성 물질을 제외한 대부분의 물질을 투과하는 특성이 있어 투과 영상을 얻을 수 있는 것이 장점이다. 그리고 이 주파수 영역은 광자의 에너지가 낮아서 물질 내부에서 광이온화 반응을 일으키지 않으므로 생체 소재에 대해서도 파괴적이지 않고, 특히 인체에 무해한 것으로 알려져 있다. 이와 같은 특성을 이용한 활용 범위는 의료 진단, 생명공학뿐 아니라 비파괴 검사를 주로 이용하는 보안 및 검색 분야, 환경 보호 등에 까지 이른다. 최근에는 고서화 등의 유물에 대한 진위 여부 판단에 사용되기도 하였다.

테라헤르츠 기술의 연구는 결맞는 특성(coherency)을 가지는 테라헤르츠파를 발생/검출하는 기술에서 시작한다. 현재까지 여러 가지 방법의 테라헤르츠파 발생 및 검출 기술이 개발되었고, 응용 분야에 따라 다양한 기술이 적용되고 있다. 이 중에서 일부 상업화에도 성공하였고, 분광 및 영상 획득을 위한 용도로 가장 많이 연구되는 방법 중의 하나는 광전도 안테나(photoconductive antenna)를 이용하는 기술이다. 이를 이용하여 0.1~수 THz 범위의 광대역 테라헤르츠파를 발생 및 검출하여 테라헤르츠 시간 영역 분광(THz-Time Domain Spectroscopy)의 새로운 장을 열었고, 투과 기능을 이용한 영상 획득에서도 많은 기술적 발전을 이루었다. 이러한 기반에는 초극단 펄스파

펄스 레이저의 기술 발전과 광전도체 소재의 특성이 중요한 역할을 하였다. 10~100 fs의 초극단 펄스는 광전도체 소재 내에서 광전하(photo-generated electric charge carrier) 전자-정공쌍(electron-hole pair)을 생성하고, 이들은 외부 전극에 가해진 직류 바이어스에 의해 이동하면서 광전류(photo current)를 형성하게 된다. 이 때 형성된 광전류 밀도의 시간에 따른 변화는 곧 전기장을 발생시키고 전자기파로서 방사된다. 이 때의 전자기파의 주파수는 광전류의 생성-소멸 시간과 관계된다. 그러므로 광전도체 소재 내에서는 수 피코초 이내에서 전자-정공쌍을 생성하고, 전극으로 이동하면서 광전류를 형성하는 과정이 필요하다. 이를 만족하는 조건의 소재는 여러 가지가 있으며, 많은 실험과 연구를 거쳐 저온 성장한 갈륨비소(Low Temperature grown GaAs; LT-GaAs) 소재가 가장 성공적으로 활용되고 있다.

본 연구는 LT-GaAs 소재에 대한 특성과 함께 정상적인 온도보다 낮은 저온에서 성장한 다결정질(polycrystalline) GaAs 소재의 물리적 특성 및 테라헤르츠파 검출 특성에 관한 것이다. 다결정질은 일반적으로 결정립계(grain boundary)의 불균일성과 방향성 때문에 정밀한 특성을 요구하는 전자 소재에는 적용하기 어려우나, 단결정에 비하여 성장이 쉽고, 가격 조건이 유리하여 태양 전지 및 디스플레이용 박막 트랜지스터에 활용되고 있다. 그러나 테라헤르츠파의 발생이나 검출에는 아직 적용된 사례가 보고되지 않아 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## II. LT-GaAs 의 특성

LT-GaAs는 저온에서 성장하여 소재 내부에 As-침전물(precipitate)을 석출시킨 것으로, 펄스 및 연속성의 테라헤르츠파를 발생/검출시키는 데에 가장 성공적으로 사용되고 있다. 이 소재는 높은 전하 이동도(mobility)와 항복 전압 및 낮은 암전류(dark current)와

짧은 전하 수명(carrier lifetime)을 가지고 있어 상기 용도에 매우 적합한 것으로 알려져 있다<sup>[2]~[6]</sup>. 박막의 성장 장치인 분자선 에피택시(MBE: Molecular Beam Epitaxy) 내에서 As의 상대적 빔 압력이 높은 상태에서 성장한 GaAs 층은 과잉의 As 원자들이 As-침전물이라고 하는 미세 결함을 형성하며, 이들은 생성된 광전하들을 포집하는 역할을 함으로써 전하의 수명을 짧게 한다<sup>[7],[8]</sup>. 따라서, As-침전물의 밀도와 크기 등을 조절하는 것은 고품질의 테라헤르츠파를 발생/검출하기 위하여 매우 중요한 요소가 된다. 본 연구에서는 LT-GaAs의 일반적 성장 온도인 250~400 °C 보다 비정상적으로 낮은 온도인 150 °C에서 성장한 다결정질 GaAs에 대하여 미세 구조 및 전기적인 특성을 분석하고, 테라헤르츠파의 발생 및 검출과의 관련성을 연구하고자 하였다. 다결정질 소재의 단점은 결정 입계가 불규칙적으로 존재하고 있어 전기적 및 구조적인 조정이 어렵다는 점이며, 이로 인하여 테라헤르츠파의 발생 및 검출용으로는 연구가 되지 않아왔다. 그러나 다결정질 GaAs 소재에서의 전하 수명은 테라헤르츠파의 발생/검출을 위하여 충분히 낮은 값을 보이는 것으로 측정되었다<sup>[9],[10]</sup>. 다결정 박막은 기판의 결정성에 관계없이 성장할 수 있으므로 기술적인 제약이 크게 줄어들고 여러 가지 다양한 형태의 실험과 적용이 가능하다. 여기에서는 LT-GaAs 층을 여러 온도 조건에서 성장하고, 이들에 대한 미세 결정 결함의 분포와 거동을 분석하였다. 그리고 극초단 펄스레이저에 의하여 생성된 광전하들의 이동도 및 전하 수명과 이러한 미세 결함과 관련성을 분석하고, 테라헤르츠파의 발생 및 검출 특성에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

## III. 실험 방법

(100) 방향을 가진 2인치 직경의 반절연(semi-insulating) GaAs 웨이퍼를 박막 성장용 기판으로 사용하

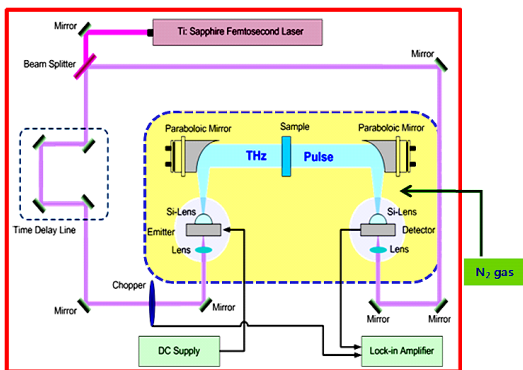
였다. GaAs 층의 성장을 위하여 전형적인 MBE를 적용하였으며, 성장 온도는 150~400 °C로 하였고, 성장 시간은 90분으로 고정하였다. MBE 챔버 내에서는 As의 빔 압력을 높은 상태로 유지하여 열처리 후 과잉의 As 원자들이 As-침전물을 형성할 수 있도록 하였다. As/Ga의 빔 압력비(BEP: Beam Equivalent Pressure)는 15~20으로 유지하였다. 성장된 GaAs 층은 동일한 MBE 챔버 내에서 600 °C의 온도로 10분간 As 분위기로 열처리하였다.

GaAs 층의 미세구조 관찰을 위하여 고분해능 투과전자현미경을 사용하였으며, 결정성의 확인을 위해서 이중 결정을 이용한 X-선 로킹 커브법(DCXR; Double Crystal X-ray Rocking Curve)을 적용하였다. 그리고 광 전하의 이동도와 전하 수명은 각각 Hall 측정 장치 및 시분해 반사도 분석 장치(Time-Resolved Reflectivity Spectrometry)를 사용하였다. 테라헤르츠파의 발생 및 검출 특성은 성장시킨 LT-GaAs 층 위에 광전도 안테나 소자를 형성한 후, 초극단 펄스 레이저를 전극 사이에 입사하여 측정하였다. 전극은 Ti/Au 금속을 사용하였고, 안테나 전극간의 간격은 발생기와 검출기용에서 각각 5 μm 및 10 μm로 하였으며, 발생기에서의 DC 바이어스 전압은 20 V로 유지하였다. 테라헤르츠파는 광전도체 소재에서 발생

하여 유전상수가 큰 물질인 기관 부분으로 방출되어 나오므로, 이것을 집속하기 위해서 초반구형(hyper-hemispherical)의 고저항 실리콘 렌즈를 부착하였다. 테라헤르츠파의 검출 특성을 측정하기 위하여 자체 제작한 THz-TDS 시스템을 사용하였다. 여기에 적용된 초극단 펄스레이저는 모드 잠금(mode-locked)형의 티타늄 사파이어 레이저로서 펄스폭은 30 fs 내외이고, 반복 속도는 80 MHz, 중심 파장은 794.4 nm이다. 발생기 안테나에는 350 °C에서 성장한 LT-GaAs 광전도 소재를 적용하였으며, 검출용 안테나에는 150, 250, 350 및 400 °C에서 성장한 LT-GaAs 소재를 적용하였다. 각각의 안테나에 입사한 펄스 레이저 펄스의 출력은 각각 10 및 15 mW로 하였다. 이 THz-TDS 측정 실험은 대기 중의 수분에 의한 테라헤르츠파의 흡수를 방지하기 위하여 별도로 제작한 제습 장치(dry station) 내에서 행해졌다. [그림 1]은 본 실험에서 사용된 THz-TDS 시스템의 구성 요소를 나타낸 개략도이다.

#### IV. 결과 및 고찰

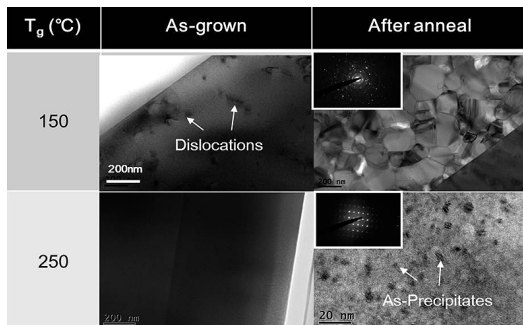
일반적인 성장 온도보다 낮은 150 °C와 정상적인 온도인 250 °C에서 각각 성장 및 열처리된 LT-GaAs 박막의 투과전자현미경(TEM: Transmission Electron Microscope) 단면 관찰 사진을 [그림 2]에 나타내었다. 150 °C에서 성장하여 열처리하기 전 상태(as-grown)인 사진을 보면, 결정 결함인 전위(dislocation) 및 전위환(dislocation loop) 등의 모습이 관찰된다. 반면에 250 °C에서 성장한 소재의 단면 사진에서는 이러한 결정 결함의 형태가 관찰되지 않는다. 전위들은 LT-GaAs 박막의 두께에 걸쳐서 고루 분포하고 있으며, 이는 박막의 성장 과정에서 과잉으로 유입된 As 원자에 의하여 결정격자에 일정 한계 이상의 압축 응력(compressive stress)이 가해지고, 이를 완화시키기 위하여 결정 결함이 생성된 것으로 판단된다. 600 °C의 열처리



[그림 1] LT-GaAs 소재의 테라헤르츠 검출 특성을 측정하기 위하여 사용된 THz-TDS 시스템의 구성도

이후에는 재결정화하는 과정에서 이러한 결정 결함으로 인하여 다결정질로 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 삼입된 전자선 회절 패턴도 다결정질을 의미하는 동심원 형태로 나타나는 것을 볼 수 있으며, 박막 내에서의 결정립도 전체 두께에 걸쳐 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 박막과 기판 사이의 계면을 관찰한 고분해능 현미경 사진에서도 결정방향의 정합성이 나타나지 않았다. 이것은 열처리 시에 재결정화의 초기 단계에서부터 이미 다결정질로 생성되었음을 보여주고 있다. 결정립의 직경은 50~300 nm의 범위에 분포하며, 평균 210 nm로 측정되었다. 각 결정립의 내부에는 As-침전물의 모습이 관찰되지 않았는데, 이는 결정 결함 및 결정립의 생성과정에서 과잉의 As 원자들이 결정립계를 따라 이동한 후 박막의 표면을 통하여 외부로 방출된 것으로 생각된다.

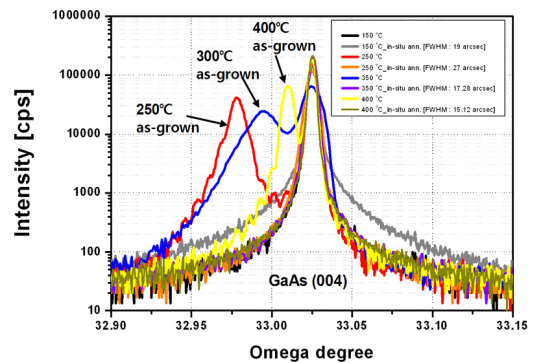
반면에, 250 °C로 성장한 후 600 °C로 열처리한 박막의 경우 모두 단결정질로서 전자선 회절 패턴도 전형적인 [2 20] 방향의 점 패턴을 보인다. 박막의 내부에서는 As-침전물들이 작은 점들로 보이는데, 이 침전물의 크기는 직경과 점간 거리가 모두 수 nm에 이르며, 전체 박막에 대하여 균일하게 분포하고 있다. 참고문헌 [8]은 미세 분석 기술을 통하여 이것이 As-침전물임을 밝혀냈으며, 고분해능 전자현미경 상으로



[그림 2] LT-GaAs 박막의 단면을 관찰한 TEM 사진으로 열처리 전후를 비교하였다. 열처리 후 단결정 및 다결정질로 형성된 것을 보이고 있다.

는 기판 매질과의 격자 간격 차이로 의한 Moire 패턴을 확인하였다. As-침전물의 평균 크기와 간격은 성장온도와 관련이 있어, 고온일수록 크기와 간격이 증가하는 것을 관찰하였다. 이것은 동일한 열처리를 하였음에도 불구하고 성장 온도의 차이에 따라 박막 내에 잔류하는 As 원자들의 양이 달라지는 것이 원인인 것으로 판단된다.

[그림 3]은 LT-GaAs 박막의 결정성을 자세하게 분석하기 위하여 고분해능의 X-선 로킹 커브를 측정된 결과를 나타낸 것이다. GaAs (004) 피크( $\theta=33.023^\circ$ )는 기판인 반절연(semi-insulating) GaAs에 의한 것이며, (004) 피크에 대해 회절각이  $\Delta\theta$  만큼 왼쪽으로 편향되어 나타난 것은 LT-GaAs 박막에 의한 것이다. 그런데, 250~400 °C의 정상적인 온도에서 성장한 박막에 대해서만 열처리 전일 때에 왼쪽의 편향이 나타났으며, 그 편향된 정도는 저온일수록 크게 나타났다. 그리고 150 °C의 비정상적인 저온에서 성장한 박막은 열처리 이전에도 왼쪽 편향의 회절각이 나타나지 않았다. 모든 박막은 열처리 후에는 편향이 없어지고 기판과 같은 (004) 피크의 회절각을 보였다. 왼쪽의 편향은 회절각의 감소를 의미하며, 이것은 격자의 (004) 면간 거리가 증가한 것을 뜻한다. 즉, As의 빔 압력이 높은 상태에서 성장한 GaAs 박



[그림 3] 여러 온도에서 성장한 LT-GaAs 박막의 열처리 전후에 대한 X-선 로킹 커브 측정 결과

막에는 과잉의 As 원자가 잔류하고 있으며, 이들은 GaAs 격자 내부에서 압축 응력을 발생시키면서 전체 격자를 팽창시키는 역할을 할 것으로 판단된다. 이에 따라 X-선 로킹 커브에서 보인 바와 같이 (004) 피크가 왼쪽으로 편향되는 결과를 보인 것이다. 이 과잉 As 원자의 양은 저온일수록 증가하므로 성장 온도가 낮을수록 편향된 정도가 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다. [그림 2]에서 편향된 회절각으로부터 Bragg 공식을 적용하여 결정격자가 팽창한 비율을 구할 수 있다. (004)면의 면간 거리 변화율은 다음과 같다.

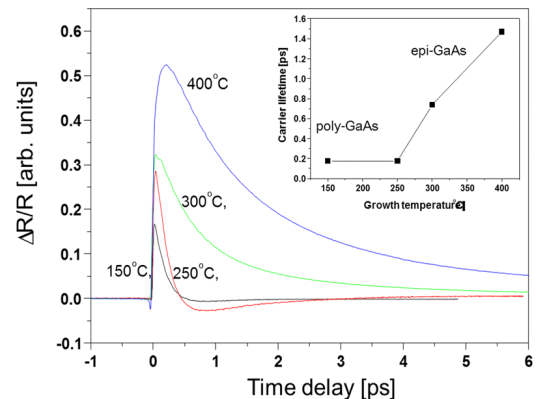
$$\frac{\Delta d}{d_{004}} \simeq \frac{\sin \theta_{(004)} - \sin \theta_{(side)}}{\sin \theta_{(side)}} \simeq \cos \theta_{(004)} \frac{\Delta \theta}{\theta_{(side)}} \quad (1)$$

여기에서  $d$ 와  $\Delta d$ 는 각각 (004)면의 면간거리 및 증가분이며,  $\theta$  및  $\Delta \theta$ 는 각각 회절각 및 증가분을 뜻한다. 이를 이용하여 구한 결정격자의 팽창률은 250, 350 및 400 °C에서 성장한 박막에 대하여 각각 0.13, 0.094 및 0.035 %로 계산되었다.

반면에 150 °C의 낮은 온도에서 성장한 경우에는 [그림 2]의 TEM 사진에서 설명한 바와 같이 압축응력이 한계치를 벗어나게 되어 결정 결함을 생성시키면서 자체적으로 응력을 해소한 것으로 보인다. 이에 따라 회절각의 편향 및 결정 격자의 팽창 등이 나타나지 않은 것으로 판단되며, X-선 로킹 커브에서도 편향값이 나타나지 않았던 것으로 보인다. 열처리 이후에 모든 박막에서 회절각의 편향이 나타나지 않은 것은 250~400 °C 성장한 박막의 경우 단결정 상태를 유지하면서 과잉의 As 원자들이 As-침전물을 형성하면서 응력을 해소하였고, 150 °C 성장 박막의 경우는 열처리 이전에 이미 결정 결함을 형성하여 응력을 해소하여, 열처리 이후에는 다결정질로

변화함에 따라 결정격자의 크기가 변하지 않았기 때문인 것으로 설명된다.

LT-GaAs 박막 내부에 존재하는 As-침전물 및 결정립계 등의 결정 결함들은 광전하들의 이동 및 포집에 큰 영향을 미치므로 각 박막에 대하여 극초단 펄스레이저에 의해 생성된 광전하들의 수명을 측정하였다. [그림 4]는 그 결과를 나타낸 것으로, 반사율 곡선의 반치폭을 전하 수명으로 가정하였다. 그림에 삽입된 전하 수명 곡선과 같이 150 °C에서 성장한 다결정 박막에서 가장 짧은 수명을 보이며, 단결정 박막에서는 성장 온도가 증가할수록 수명이 길어지는 현상이 관찰되었다. 이와 같은 현상은 박막 소재 내부의 미세구조, 즉 결정 결함의 종류와 분포에 의하여 전하의 수명이 크게 의존한다는 것을 의미한다. 결정립계와 As-침전물은 모두 전하의 이동에 직간접적인 영향을 미치며, 결정립계의 경우 결정립 내부에 비하여 높은 에너지 상태로서 계면 전하 및 불순물들의 침적이 일어난다. 따라서 광전하들의 포집이 강하게 발생할 것으로 생각된다. 이에 반하여 단결정질 내에 존재하는 As-침전물은 그 분포 상태에 따라 광전하의 포집 특성이 영향을 받는 것으로 판단된다.



[그림 4] 저온 성장된 LT-GaAs 박막의 600 °C 열처리 후에 측정된 전하 수명

테라헤르츠파의 발생이나 검출에는 광전하의 수명과 함께 이동도가 중요한 요소이므로 광전도체 소재의 전하 이동도 특성을 측정하였다. [그림 5]는 그 측정 결과로서 성장 온도에 따른 각 GaAs 소재의 전하 이동도 및 전하 운반자 밀도(charge carrier density)를 보인 것이다. 150 °C에서 성장한 다결정 GaAs에서 가장 높은 전하 이동도와 가장 낮은 전하 운반자 밀도를 보이고 있다. 전하 밀도가 낮게 나타난 것은 실험 오차의 영향도 있으나, 결정립계에 의한 포집이 강하게 나타난 것이 원인인 것으로 생각된다. 전하 이동도의 경우, 250 °C 이상의 온도에서 성장한 단결정 GaAs와는 다른 요인에 의하여 높게 나타난 것으로 판단된다. 그리고 단결정 GaAs 박막의 경우 성장온도에 따라 증가하는 경향을 보이고 있는 것도 결정 결함 As-침전물의 분포와 관련이 있는 것으로 생각된다. 여기에서는 간단한 모델을 구성하여 [그림 5]의 전하 이동도에 대한 분석을 하고자 한다.

일반적으로 전하 이동도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_{DC} = \frac{v_d}{E} \quad (2)$$

여기에서  $\mu_{DC}$ 는 소재의 특성을 표현하는 일반적인 이동도를 뜻하고,  $v_d$ 는 전하의 유동 속도(drift velocity),  $E$ 는 이 소재에 가해진 DC 바이어스 전기장이다. 유동 속도의 값은 전하가 이동한 거리를 전하 수명으로 나누어 주어 얻을 수 있다. 이 때에 측정된 전하 수명은 이동에 소요된 시간으로 가정한다. 다결정질 소재에서는 결정립계가 완전한 전하의 포획 장소(capturing site)라고 보면 전하의 평균 이동거리를 평균 결정립의 직경으로 볼 수 있다. 따라서 식 (2)의 유동 속도  $v_d$ 는 계산하여 구할 수 있다. 그리고 바이어스 전압  $E$ 는 광전도 안테나 전극으로부터  $5\mu\text{m}$ 에 20 V가 가해졌으므로 이를 각각 식 (2)에 대입하면 다결정 GaAs에서의 전하 이동도는  $3,017\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$

로 구해진다.

As-침전물을 포함하고 있는 단결정 GaAs 박막의 경우, 전하의 이동도를 구하는 것은 다결정과 다른 방법을 선택해야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 잘 알려진 평균 자유 행로(mean free path)의 개념을 도입하였다. 즉, 소재 내부에서 발생한 광전하가 DC 바이어스 전압에 의하여 이동하면서 최초로 만나는 As-침전물에 의하여 포집될 때까지의 거리를 평균 자유 행로라고 하고, 그 동안의 시간은 [그림 4]에서 측정된 전하 수명이라고 가정할 때에 이동도는 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다. 평균 자유 행로는 전하 운반자들의 이동 속도가 Maxwell 분포를 가진다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$l = (\sqrt{2}\sigma n)^{-1} \quad (3)$$

여기에서  $l$ 은 평균 자유 행로,  $\sigma$ 는 전하와 충돌하는 입자들의 산란단면적이며,  $n$ 은 입자들의 단위체적 당 개수, 즉 밀도이다.  $\sigma$ 는 As-침전물의 평균 직경을  $d$ 라 할 때에 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 \quad (4)$$

그리고 As-침전물의 단위 부피당 개수, 즉 분포 밀도를 구하기 위하여 이 침전물들의 분포를 다이아몬드 입방체 결정구조에서 각 격자점에 존재한다고 가정하였다. 그 근거는 GaAs 소재의 결정구조가 다이아몬드 구조와 동일한 첨아연광(zinc blend) 구조이기 때문이다. 이에 따라 충돌 입자인 As-침전물의 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \frac{3\sqrt{3}}{8} s^{-3} = 0.65s^{-3} \quad (5)$$

여기에서  $s$ 는 As-침전물 간의 평균 거리를 의미한

<표 1> 저온 성장한 LT-GaAs 박막의 전하 이동도를 계산한 결과

Tg. (°C)	150	250	300	400
Crystal structure	Poly l=210 nm	Single d=2.5 nm s=7.4 nm	Single d=2.7 nm s=12.4 nm	Single d=5.2 nm s=28.4 nm
Travel distance (nm)	210	89.9	362.8	1,175.0
Lifetime τ (ps)	0.174	0.194	0.738	1.47
Mobility μ <sub>DC</sub> (cm <sup>2</sup> /V.s)	3,017	1,177	1,228	1,998

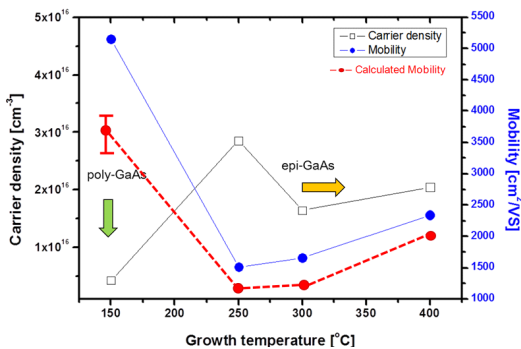
다. 식 (3)의 평균 자유 행로, 즉 전하의 이동거리는 식 (4)와 (5)를 대입하여 식 (6)과 같이 주어진다.

$$l=1.378s^3d^{-2} \quad (6)$$

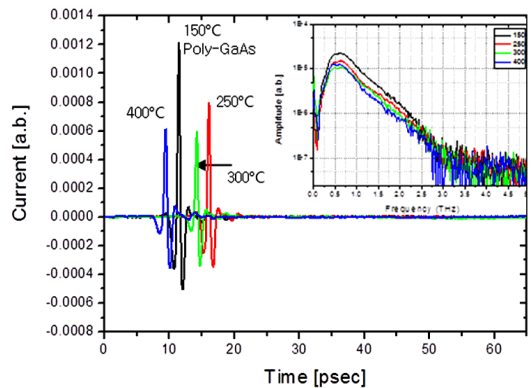
다결정의 경우, 전하의 이동거리는 평균 자유 행로 대신에 평균 결정립의 직경으로 나타낼 수 있으며, 단결정의 경우와 같이 전하 이동도를 구할 수 있다. 이와 같이 하여 얻어진 각 GaAs 박막에서의 전하 이동도를 <표 1>에 보였다. 표에서 계산된 전하 이동도는 실험에 의하여 구해진 값과 비교를 위하여 [그림 5]에 동시에 나타내었다. 그림에서와 같이 실험치와 계산치가 정확히 합치하지는 않지만 전반적

인 경향은 일치하는 것으로 나타났다. 이것은 계산을 위하여 설정한 여러 가지 가정의 타당성을 보이는 것으로 생각된다. 다결정 GaAs에서 전하이동도는 가장 큰 값을 보였는데, 이것은 결정립 내부에서 전하가 매우 빠른 속도로 움직이며, 결정립계에 의한 포집이 강하게 일어나는 것을 뜻한다. 또한 전하의 밀도가 낮게 나타난 것은 대부분의 전하가 결정립계에서 포집이 되었기 때문인 것으로 판단된다.

단결정 및 다결정 GaAs를 이용하여 광전도 안테나 소자를 제작한 후 테라헤르츠 특성을 측정하기 위하여 [그림 1]의 THz-TDS 시스템을 활용하였다. [그림 6]은 검출기 안테나에서 측정된 LT-GaAs 소재의 테라헤르츠 특성이다. 시간 영역 테라헤르츠파형



[그림 5] 저온 성장된 LT-GaAs 박막의 600 °C 열처리 후에 측정된 전하 이동도, 전하 밀도 및 계산에 의한 전자 이동도



[그림 6] 저온 성장한 GaAs 박막의 테라헤르츠파 검출 특성 측정 결과

을 관찰한 결과, 단결정 및 다결정 GaAs에서 모두 테라헤르츠파가 1:1000 이상의 신호대 잡음비를 가지는 것으로 검출되었으며, 이를 푸리에 변환하여 주파수 영역의 테라헤르츠 분광을 하였을 때에 검출된 테라헤르츠파의 주파수 영역은 0.1~3.0 THz에 이르렀다. 150 °C에서 성장한 다결정 GaAs 박막에서 가장 높은 신호가 검출되었으며, 주파수 영역도 넓게 나타났다. 이 것은 전하 이동도의 측정 및 계산치와 일치하는 특성으로서 단결정 GaAs 소재의 As-침전물보다 결정립계의 전하 포집 효과가 우수한 것을 의미하며, 이에 따라 활용가능성이 높아질 수 있음을 보인다. 250 °C 이상의 온도에서 성장한 단결정 GaAs 박막의 경우 테라헤르츠파의 검출 특성이 온도에 따라 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 전하 이동도에서도 온도에 따른 변화가 크지 않았던 것과 같은 경향을 보인다.

## V. 결 론

저온성장한 LT-GaAs 박막 소재에 대하여 미세 결정 결함이 테라헤르츠파의 검출 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 비정상적으로 낮은 온도에서 성장한 다결정 GaAs 박막의 결정립계와 정상 온도에 성장한 단결정 GaAs 박막의 As-침전물은 모두 광전하를 포집하는 기능을 하였다. 다결정 GaAs 박막에서 가장 짧은 전하 수명과 가장 높은 전하 이동도를 가지는 것으로 측정되었다. 각 LT-GaAs 박막의 전하 이동도를 계산에 의해 구하기 위하여 다결정 박막에서는 결정립계 효과를, 단결정 박막에서는 As-침전물에 의한 전하의 평균 자유 행로 개념을 도입하였다. 간단한 모델을 설정하여 계산한 전하 이동도의 값은 실험을 통하여 측정된 값과 같은 경향을 보였으며, 이는 본 연구에서 설정한 모델의 가정이 타당성을 가지는 것으로 분석된다. 테라헤르츠파의 검출 특성은 다결정 GaAs에서 가장 높게 나타났으며, 이는 향후 다결정

GaAs 박막의 활용 가능성을 보여준다. 다결정 GaAs는 기관의 종류에 관계없이 성장이 가능하며, 테라헤르츠 특성을 향상시킬 수 있는 광전도 소재의 활용범위를 확장시킬 수 있음을 의미한다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. B. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Chen, and X.-C. Zhang, "Terahertz spectroscopy and imaging for defence and security applications", *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 8, pp. 1514-1527, Aug. 2007.
- [2] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, "Picosecond photo-conducting Hertzian dipoles", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 3, pp. 284-286, 1984.
- [3] A. C. Warren, N. Katzenellenbogen, D. Grischkowsky, J. M. Woodall, M. R. Melloch, and N. Otsuka, "Subpicosecond, freely propagating electromagnetic pulse generation and detection using GaAs:As epilayers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 14, pp. 1512-1514, 1991.
- [4] M. B. Ketchen, D. Grischkowsky, T. C. Chen, C.-C. Chi, I. N. Durling, III, N. J. Halas, J.-M. Halbout, J. A. Kash, and G. P. Li, "Generation of sub-picosecond electrical pulses on coplanar transmission lines", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, no. 12, pp. 751-753, 1986.
- [5] Y. C. Shen, P. C. Upadhyaya, E. H. Linfield, and H. E. Beere, "Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 15, pp. 3117-3119, 2003.
- [6] Y. C. Shen, P. C. Upadhyaya, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, I. S. Gregory, C. Baker, W. R. Tribe, and M. J. Evans, "Generation and detection of ultrabroadband terahertz radiation using



- photoconductive emitters and receivers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 2, pp. 164-166, 2004.
- [7] M. Fatemi, B. Tadayon, M. E. Twigg, and H. B. Dietrich, "High-temperature X-ray analysis of strain in low-temperature GaAs", *Phys. Rev. B*, vol. 48, no. 12, pp. 8911-8917, 1993.
- [8] D. H. Youn, S. H. Lee, H. C. Ryu, S. Y. Jeong, S. B. Kang, M. H. Kwak, S. I. Kim, S. K. Choi, M. C. Baek, K. Y. Kang, C. S. Kim, K. J. Yee, Y. B. Ji, E. S. Lee, T. I. Jeon, S. J. Kim, S. Kumar, and G. H. Kim, "Effects of post-growth annealing on the structure and electro-optical properties of low-temperature grown GaAs", *J. Appl. Phys.* 103, 123528, 2008.
- [9] J. J. J. Yang, P. D. Dapkus, R. D. Dupuis, and R. D. Yingling, "Electrical properties of polycrystalline GaAs films", *J. Appl. Phys.* vol. 51, no. 7, pp. 3794-3800, 1980.
- [10] J-F. Roux, J-L. Coutaz, "Time-resolved reflectivity characterization of polycrystalline low-temperature-grown GaAs", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 17, pp. 2462-2464, 1999.
- [11] Se Young Jeong, et al., "Terahertz wave detection with polycrystalline GaAs films", *Tera Tech 09 (2<sup>nd</sup> International Workshop on THz Technology*, Osaka Japan 1P-06, 2009.
- [12] S. Chapman, T. G. Cowling, *The Mathematical Theory of Non-uniform Gases 3rd Edition*, Cambridge Univ. Press. p. 80, 1990.

≡ 필자소개 ≡

백 문 철



1979년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학사-금속공학 부전공)  
1982년 2월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)  
1989년 8월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학박사)  
1982년 4월~2011년 5월: 한국전자통신

연구원 책임연구원

2011년 5월~현재: 케이맥주식회사 연구소장

[주 관심분야] 반도체 및 전자소재, 고밀도 정보저장 미디어, 테라헤르츠 소재/소자, 바이오/의료진단기기

곽 민 환



1995년: 경상대학교 전자재료공학과 (공학사)  
1998년: 경상대학교 전자재료공학과 (공학석사)  
2002년: 경상대학교 전기공학과 (공학박사)  
2002년~현재: 한국전자통신연구원 테라헤르츠연구팀 선임연구원

[주 관심분야] THz 분광/이미징 시스템, THz 송수신소자, 산

화물 무선통신소자 등

강 광 용



1975년: 서울대학교 섬유공학과 (공학사)  
1982년: 국립경상대학교 물리학과 (이학석사)  
1988년: 부산대학교 물리학과 (이학박사)  
1989년~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원, 테라헤르츠연구팀장

[주 관심분야] 강상관전자계 소재/소자, 고온초전도 소자/시스템, THz 소재/소자/시스템(분광/이미징) 개발

강 승 범



1995년: 충북대학교 물리학과 (이학사)  
1998년: 충북대학교 물리학과 (이학석사)  
2008년: 충북대학교 의공학과 (공학박사)  
2007년~현재: 한국전자통신연구원 테라헤르츠연구팀 선임연구원

[주 관심분야] THz 소자 및 분광/이미징 시스템, THz 생체 의료 계측, 바이오

포토닉스