

논문 2007-44SD-7-1

## GaAs Gunn 다이오드 소자의 제작과 부정미분저항

(Fabrication of GaAs Gunn diodes and Characterization of Negative Differential Resistance)

김 미 라\*, 이 성 대\*, 채 연 식\*, 이 진 구\*

(Mi-Ra Kim, Seong-Dae Lee, Yeon-Sik Chae, and Jin-Koo Rhee)

## 요 약

고주파에서 동작하는 높은 출력전력과 dc-*rf* 변환효율을 가진 GaAs Gunn 다이오드에 대한 기본 연구로써, *graded gap injector*를 가진 *planar* 형태의 GaAs Gunn 다이오드를 제작하고 그 DC 특성을 살펴보았다. 제안된 에피 구조를 사용하여 GaAs Gunn 다이오드 소자를 설계, 제작하였으며 이동전자소자인 Gunn 다이오드의 DC 특성이 부정미분저항을 가짐을 확인하였다. 제작된 소자의 부정미분저항 특성을 다이오드의 cathode 반지름의 함수로 고찰하였으며, 이 과정을 통하여 계곡 간 전자 이동 특성을 분석하였다.

## Abstract

The DC characteristics of GaAs Gunn diode are investigated as a preliminary study on the planar grade gap injector GaAs Gunn diode which is the transferred electron device with high output power and dc-*rf* conversion efficiency. The Gunn devices we fabricated were confirmed to have the DC characteristics of negative differential resistance(NDR). We discussed the nature of the NDR effect, including the electron intervalley transfer; the NDR effect was examined for six different cathode radii.

**Keywords :** GaAs, Gunn diode, Transferred electron device, Negative differential resistance

## I. 서 론

GaAs와 같은 III-V족 화합물 반도체에서 Ridley와 Watkins<sup>[1]</sup> 그리고 Hilsum<sup>[2]</sup>이 이동전자효과에 의한 음성미분저항(Negative Differential Resistance; NDR)의 가능성을 지적한 이후, 1963년 J. B. Gunn<sup>[3]</sup>이 GaAs에서 뜨거운 전자에 의한 전류의 측정을 통하여 어떤 특정 전기장 이상에서 전류밀도(속도)가 전압(전기장)에 대해 증가하지 않고 시간에 대하여 진동함을 관측하였다. 전류밀도와 전기장이 역 비례하는 이 불안정한 영

역이 음성 저항 값을 주는 NDR 영역이며, 이것이 Gunn 진동(oscillation)의 원인이다. 불안정한 상태의 전류가 NDR을 통하여 아주 다른 상태로 가는 중에 전류가 시간 간섭성을 가지고 진동하며, 그 진동수는 마이크로파 영역에 해당된다. 이 메카니즘이 마이크로파 및 밀리미터파에서의 Gunn 발진기와 증폭기에 이용된다. Gunn 다이오드는 n+nn+의 샌드위치 구조의 양 끝에 오믹 접촉을 갖는 균일한 시료이다. 비록 그 구조는 간단하지만 원하는 주파수에서 원하는 출력 특성과 효율을 가지는 Gunn 소자를 제작하기 위해서는 활성 영역(active layer)의 길이와 구조, 이동도, 도핑, 접촉, 그리고 열 방출 문제와 같은 조건들이 중요하고 세심하게 고려되어야 한다.

본 논문에서는 94GHz planar Gunn VCO (Voltage Controlled Oscillator) 개발의 기본 연구로써, Gunn VCO의 핵심소자인 GaAs Gunn 다이오드를 제작하고

\* 정회원, 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (Millimeter-wave Innovation Technology Research Center, Dongguk University)

※ 본 연구는 동국대학교 밀리미터파 신기술 연구센터 (MINT)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 (ERC) (R11-1999-058-02005-0) 지원금에 의해 수행되었음.

접수일자: 2006년10월13일, 수정완료일: 2007년6월19일

NDR 특성에 대하여 논의하였다. 위의 다이오드는 플립 칩(flip chip) 형태의 밀리미터파 VCO 구성에 유리하도록 반 절연 GaAs 기판위에 성장되어진 에피 구조를 바탕으로 메사식각 및 오믹 금속 접촉형성 등의 표준 공정을 통하여 planar 형태로 제작되었다. 소자는 94GHz에서 40 mW 이상의 높은 출력전력을 가지도록 설계되었으며, DC 측정을 통한 NDR 효과의 관측을 통하여 Gunn 다이오드의 성공적인 제작을 확인하였고, 계곡 간 전자의 이동을 분석하였다. Planar VCO의 단점은 waveguide cavity나 coaxial cavity 구조 보다 낮은 Q 값을 가진다는 것이다. 그러나 이 구조는 cavity 구조보다 튜닝이 쉽고 가벼우며 열 방출을 위한 패키징의 어려움을 피할 수 있는 장점을 가진다. Gunn 다이오드는 효율이 매우 낮은 소자이기 때문에 소자 자체에서 발생하는 열의 효과적인 방출이 매우 중요하다. Planar 구조의 경우, 표준 패키징의 과정이 생략되기 때문에 Gunn 다이오드의 열 방출 방법이 중요시 되는데, 본 연구에서는, 제작된 planar 구조의 Gunn 다이오드를 AlN 기판의 VCO에 마운트 시킴으로써 별도의 열 방출 구조를 사용하지 않는다. 이는 VCO 회로 설계에서 Gunn 다이오드의 cathode와 anode의 전극을 여러 개로 분리하여 Gunn 다이오드 자체에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시키는 것이다. 즉, 여러 개로 분리된 전극이 AlN 기판에 직접 접촉됨으로써 열 방출 경로가 분산되고 이로써 열이 효과적으로 처리된다. AlN 기판을 사용한 planar Gunn VCO에 대한 연구는 A. Nakagawa et al<sup>[4]</sup>과 K. Wadanabe et al<sup>[5]</sup>에 의해 77GHz의 자동차 레이더 시스템의 응용 연구에서 이루어졌지만 94GHz planar Gunn VCO 와 Gunn 다이오드 대한 연구는 그 연구가 거의 이루어지지 않은 상태이다. 이에 우리는 군사용 레이더 시스템의 응용에 필수적인 94GHz planar VCO 개발을 위하여 planar 형태의 GaAs Gunn 다이오드 소자를 설계, 제작하였다. 제작된 다이오드의 DC 특성을 다이오드 cathode 반지름의 함수로 조사하였다. 이 과정을 통하여 계곡 간 전자기동과 같은 NDR 성질을 고찰하고, 고효율 94GHz GaAs Gunn 다이오드를 얻기 위한 조건들에 대해 논의하였다.

## II. Gunn 다이오드의 동작 원리

이동전자효과(Transferred Electron Effect; TEE)에 의해 나타나는 NDR 현상이 전류 불안정과 Gunn 발진을 가져오게 한다. TEE는 GaAs, InP, GaN 와 같은 반

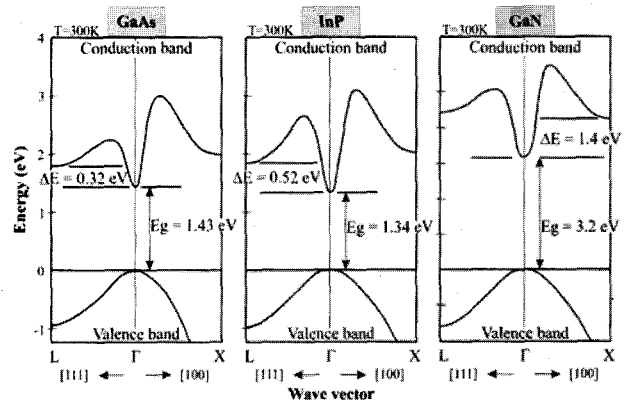


그림 1. 섬아연광 구조를 가지는 GaAs, InP, GaN의 간략화된 밴드구조<sup>[6]</sup>

Fig. 1. Simplified band structure of zinc-blend GaAs, InP, and GaN<sup>[6]</sup>.

도체에서 관측되며 위와 같은 직접 갭 반도체 물질들의 밴드 구조를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 GaAs의 경우,  $E_g = 1.43$  eV 이고 전도대에서 중앙계곡과 위성계곡 사이의 에너지 차이  $\Delta E = 0.32$  eV 이다. Gunn 다이오드의 동작은 전적으로 TEE에 의존하며, 효과적인 TEE를 얻기 위한 기본 조건은  $\Delta E$ 가  $E_g$ 보다 작아서 avalanche breakdown 근처의 전압을 피할 수 있어야 한다. GaAs에 약 3.5 kV/cm 정도의 전기장이 인가되면 낮은 에너지의  $\Gamma$  계곡 전자들은 0.32 eV이상의 에너지를 얻어 상당량의 전자들이 높은 에너지의  $L$  계곡으로 이동한다.  $L$  계곡으로 이동한 대부분의 전자들은 높은 에너지에 점유된 상태로 존재한다.  $\Gamma$  골짜기에 있는 전자의 유효질량은  $m^* = 0.068m_0$ 이고  $L$  골짜기로 산란된 전자들의 것은  $m^* \approx 0.4m_0$ 이다<sup>[7]</sup>. 전자의 유효질량이 크고 이동도가 낮은 상태에서 NDR 효과가 나타나며 이때 n-GaAs는 열역학적으로 불안정한 상태가 된다. 불안정한 상태의 전자들은 도메인을 형성하고 이것들은 일련의 펄스 형태로 흐르면서 전류를 형성한다. 이동전자소자는 여러 모드(mode)로 작동되며, 이 작동 모드들은 인가전압과 공진회로에 의해 결정된다. Transit-time 소자로서의 Gunn 다이오드가 발진기로 이용될 경우 그 발진주파수는  $f = v_d/l$ 이다<sup>[7]</sup>. 여기서,  $l$ 은 시료(활성영역)의 길이,  $v_d$ 는 전자의 평균 유동속도이다. 일반적으로, Gunn 발진기에서 Gunn 다이오드는 resonant cavity내에 위치하며 그 발진 주파수는 cavity에 의해 결정된다. NDR 영역에 인가된 바이어스는 cavity resonance 진동수에서 다이오드를 진동하게 만든다. 발진 특성과 잡음

특성이 우수한 GaAs Gunn 발진기는 100 GHz 까지 발진이 가능하며 수 mW에서 수 W까지의 CW 파워를 만들어 낼 수 있다.

### III. GaAs Gunn 다이오드의 구조 및 제작

#### 1. GaAs Gunn 다이오드의 에피 구조

높은 출력과 효율을 가지는 94 GHz Gunn 다이오드를 개발을 위하여 Graded Gap Injector(GGI) GaAs Gunn 다이오드 에피 구조를 사용하였다. 이 구조는 초기에 Hutchinson et al<sup>[8]</sup>과 Couch et al<sup>[9]</sup>에 의해 제안되었는데, 본 연구에서는 S. Montanari et al<sup>[10]</sup>에 의해 제안된 GGI GaAs Gunn 다이오드의 에피 구조를 사용하였다. 이 구조는 반 절연 GaAs 기판 위에 anode(collector) 금속 접촉을 형성하기 위한 7000 Å의 두께와  $4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 불순물 농도를 갖는 n+ 접촉 형성층을 설계한 후 그 위에 1.6 μm의 두께와  $1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 불순물 농도를 갖는 n-활성영역이 성장 되도록 설계하였다. 활성영역 위에 50 Å의 두께와  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  불순물 농도의 델타(δ) 도핑 층을 설계하였으며, GGI로서 500 Å두께의 진성 경사 (graded)  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  층을 설계하였다.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  층의 Al의 조성비는 성장 시 격자가 끊어지는 것을 막고 최대의 부정합 구조를 얻기 위하여 0.3에서 0까지 선형적으로 변화를 갖도록 설계되었다.

또한 GGI  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  층 상, 하부에 경사 장벽으로의 도핑 확산을 막기 위하여 100 Å의 진성 GaAs 스페이서 (spacer) 층을 설계하였다. 마지막으로 cathode

GaAs	5000 Å	$4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
GaAs	100 Å	Undoped
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (0.3 ~ 0)	500 Å	Undoped
GaAs	100 Å	Undoped
GaAs	50 Å	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
GaAs	16000 Å	$1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
GaAs	7000 Å	$4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
S. I. GaAs		

그림 2. GGI GaAs Gunn 다이오드의 에피 구조  
Fig. 2. GGI GaAs Gunn diode layer structure.

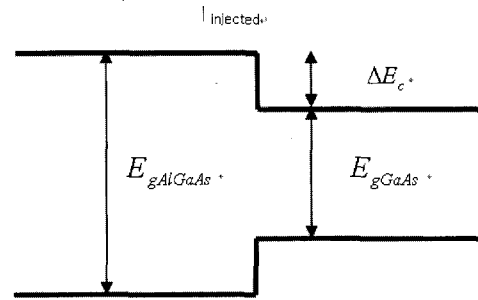


그림 3. 에너지밴드 다이어그램에서의  $\Delta E_c$   
Fig. 3. Conduction-band discontinuity  $\Delta E_c$  in the energy band diagram.

(emitter) 금속 접촉을 형성하기 위한 5000 Å의 두께와  $4.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의 불순물 농도를 갖는 n+ 접촉 형성층을 설계하였다. 그림 2에 설계된 Gunn 다이오드의 에피 구조를 나타내었다.

GGI GaAs Gunn 다이오드는 conventional n+nn+ 구조에  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  injector를 포함시킴으로써 고주파에서 높은 효율과 출력전력을 얻도록 설계된 구조이다. 이 메커니즘의 기본 개념은 높은 에너지를 가진 뜨거운 전자들을 다이오드의 cathode 쪽에 주입하는 것이다. 뜨거운 전자의 주입은 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  이질접합 (heterojunction)의 계면에 형성되는 접합 장벽(barrier)의 에너지 불연속성에 의해 구현되며, 여기서 전자는 계면에 수직으로 운동한다. 이질접합 계면에 형성된 GaAs와  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  전도대의 에너지 불연속 양  $\Delta E_c$ 는 empirical 관계<sup>[11]</sup>

$\Delta E_c = 0.7 \times [E_{g, \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}} - E_{g, \text{GaAs}}]$ 에서 Al의 조성비에 의해 결정된다. 그림 3에서  $\Delta E_c$ 를 에너지 밴드 다이어그램으로 보여주고 있다.

#### 2. GaAs Gunn 다이오드의 제작

상기에서 설계된 GaAs Gunn 다이오드의 에피 구조는 MBE(Molecular Beam Epitaxy)를 이용하여 성장되었고, 성장된 에피를 이용하여 GaAs Gunn 다이오드를 제작하였다. 그림 4는 Gunn 다이오드의 단면 구조를 나타낸 것이다. Gunn 다이오드의 제작은 크게 식각과 오믹 금속 접촉형성 공정으로 구분된다. 그림 5는 Gunn 다이오드의 제작 순서를 나타낸 것이다. cathode가 형성될 부분을 묘화 공정(lithography)을 이용하여 패턴을 형성한 후, 식각 방법을 이용하여 cathode 금속 층을 노출시켰다. cathode 패턴은 AZ1512 PR (photoresist)를

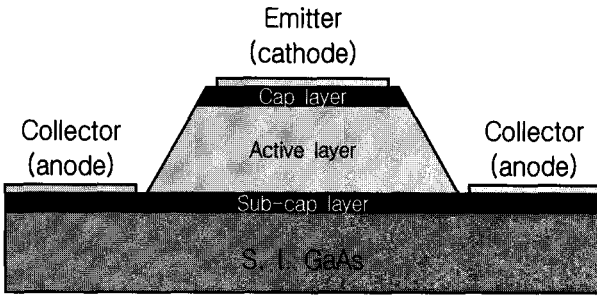


그림 4. GaAs Gunn 다이오드의 단면 구조  
Fig. 4. Schematic of the GaAs Gunn diode.

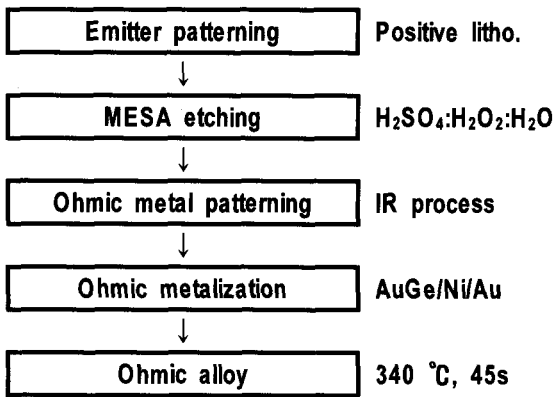


그림 5. GaAs Gunn 다이오드 제작 순서  
Fig. 5. Fabrication process of the GaAs Gunn diode.

이용한 양성 (positive) 묘화 공정<sup>[12]</sup>을 이용하여 형성되었다. 메사 식각은 건식 또는 습식 식각 방법을 이용하여 이루어지며, 본 논문에서는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 및 DI(de-ionized) water (H<sub>2</sub>O)를 각각 1:8:160의 비율로 혼합한 식각 용액을 사용한 습식 식각 방법을 이용하였다. 상기의 식각 용액은 2550 Å/min의 식각율을 나타내었으며, 9분의 시간 동안 총 2.3 μm의 두께를 식각함으로써 cathode 금속 접촉 층을 노출시켰다. AZ 5214E PR과 영상 반전(image reversal; IR) 공정<sup>[13]</sup>을 이용하여 오믹 금속 패턴을 형성한 후 AuGe/Ni/Au (1450/280/1600 Å)의 오믹 금속을 증착하였으며, 금속과 반도체 간의 접촉저항을 감소시키기 위하여 340 °C의 온도에서 45 초 동안 열처리 공정(Alloy)을 수행하였다. 금속-반도체 접촉의 전기적 질과 기계적 안정성은 Gunn 다이오드의 효율과 수명을 결정하는데 중요한 요소로서 작용하며 오믹 접촉 공정은 Planar 형태의 발전기 접촉과 S-parameter 측정을 위하여도 또한 중요하다.

그림 6 에 제작된 GGI GaAs Gunn 다이오드의 표면 사진을 나타내었다. Gunn 다이오드는 transit-time 소자이기 때문에 활성영역의 길이는 다이오드의 동작에 중요한 역할을 한다. 이는 특히 다이오드에서 최적의

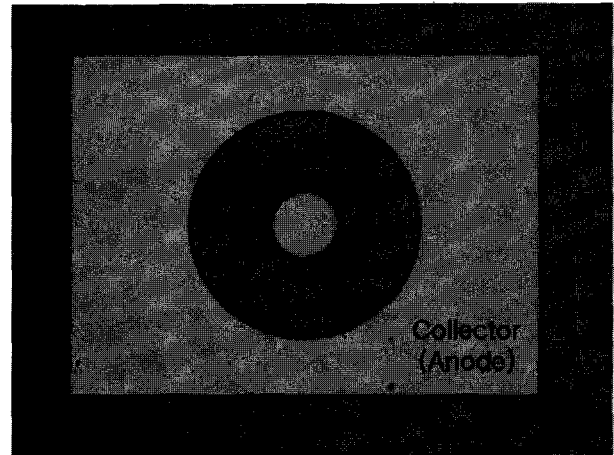


그림 6. 제작된 GaAs Gunn 다이오드  
Fig. 6. Top-view of the fabricated GaAs Gunn diode.

동작 주파수를 얻는데 매우 중요한 요소이다. 1999년 M. A. Harry et al<sup>[14]</sup>은 활성영역의 길이와 진동수의 관계를 이론적으로 구하였다. GaAs는 기준 주파수 발진을 이용할 경우 65GHz까지 유효하며, 고조파를 이용할 경우 약 90GHz에서 140GHz까지의 주파수에서 높은 출력전력을 가지는 다이오드의 동작이 가능하다. 94GHz에서 제 2 고조파 모드 동작을 이용하여 이 다이오드가 Q 밴드에서 동작되도록 활성영역의 길이를 선택하고, 이때 94 GHz의 동작 주파수를 얻기 위하여 활성영역의 길이를 1.6μm로 택하였다.

#### IV. 측정결과 및 논의

HP4156A DC parameter analyzer를 사용하여 제작된 GGI GaAs Gunn 다이오드의 DC 특성을 측정하고 그 결과들을 고찰하였다. GGI GaAs Gunn 다이오드의 I-V특성 측정 결과들로부터, 계곡 간 전자 이동과 같은 NDR 성질과 전류 밀도와 전압의 관계를 살펴보았다. 위의 결과들은 T = 300K에서 GGI GaAs cathode의 반지름을 30 μm ~ 40 μm까지 2μm씩 변화시키면서 측정된 것이다. 여기서, 활성 영역의 길이는 1.6μm이고 도핑 농도는 1.1 × 10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>이다. 본 연구에서는 III 장 1절에서 논의된 바와 같이, 뜨거운 전자를 다이오드의 활성영역 또는 통과영역(transit region)으로 주입시키는 GGI GaAs Gunn 다이오드 구조를 사용하였다. GGI는 Gunn 다이오드에서 소위 dead zone이라는 것을 효과적으로 제거하여 소자의 효율과 출력을 향상시키는 수단으로 사용된다. Dead zone은 Gunn 다이오드의 기준 주파수의 제한 요소로 작용하며, 계곡 간 전자의 이

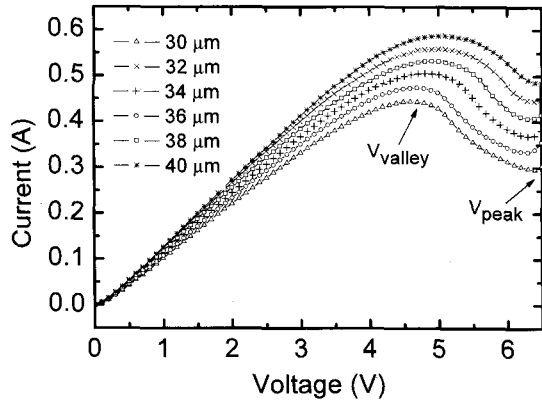


그림 7.  $T = 300\text{K}$ 에서 다른 cathode 반지름을 가진 GGI GaAs Gunn 다이오드의 I-V 특성  
 Fig. 7. I-V characteristics of the GGI GaAs Gunn diode for different cathode radii at  $T = 300\text{K}$ .

동을 지배하는 가속-감속 그리고 에너지 이완시간과 밀접하게 관련된다. 가속-감속과 에너지 이완시간이 활성 영역에서 dead zone을 만들기 때문에 이의 효율적인 제거는 이완시간의 감소와 함께 높은 주파수에서의 다이오드 동작을 의미한다. 에너지 이완시간은 GaAs에서 1.5ps, InP에서 0.75 ps, 그리고 GaN에서는 0.15 ps 으로서,<sup>[6,15]</sup> GaN에서 가장 높은 동작주파수를 예측할 수 있다.

본 연구에서 제작된 GGI GaAs Gunn 다이오드에서 cathode는 emitter역할을, anode는 collector역할을 한다. 순 방향 전압이 다이오드에 가해지면 cathode로 주입된 전자는 활성영역을 지나 anode로 이동하게 된다. 바이어스가 문턱 값을 넘게 되면, NDR 특성이 나타남을 관측 할 수 있다. Gunn 다이오드에 가해지는 바이어스의 양은  $V_D > V_{CR} = lE_{th}$ 이다. GaAs에서 문턱 전기장은  $E_{th} = 3.5\text{kV/cm}$  이고 본 연구에서 사용한 활성영역의 길이  $l = 1.6\mu\text{m}$  이므로  $V_{CR} = 0.56\text{V}$ 으로 주어진다. 따라서 다이오드에 0.56V 이상의 바이어스가 인가된 상태에서 NDR영역이 형성되며, 전류 불안정 영역에서 다이오드 동작을 확인할 수 있다. 6개의 다른 cathode 반지름  $R$ 에서 GaAs Gunn 다이오드의 I-V 특성 측정결과를 그림 7 에 나타내었다. 그림 7 이 보이는 바와 같이, 제작된 6개의 Gunn 다이오드들에서, 전압의 증가가 전류의 감소를 가져오는 NDR 영역이 존재한다.

$V_{valley} \sim V_{peak}$ 가 이 영역에 해당되며, 여기서  $\frac{dV}{dI} < 0$ 이다.  $R = 30\mu\text{m}$ 의 경우, GaAs의 NDR 개시 전압  $V_{valley}$ 는 4.6V이고, 이 값은  $R$ 의 크기가  $2\mu\text{m}$ 씩 증가

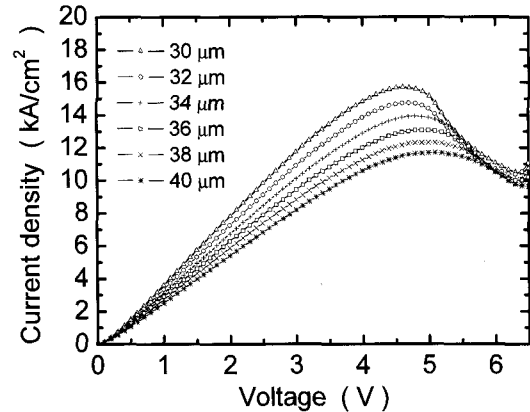


그림 8.  $T = 300\text{K}$ 에서 다른 cathode 반지름을 가진 GGI GaAs Gunn 다이오드의 전류밀도-전압 특성  
 Fig. 8. Current density-voltage characteristics of the GGI GaAs Gunn diode for different cathode radii at  $T = 300\text{K}$ .

할 때마다 0.1V 씩 증가함을 볼 수 있다. 덧붙여서,  $R$ 에 대해 전류 peak 또한 증가한다. NDR 개시 전압은 밴드 구조에 따른 물질 고유의 값이므로  $V_{valley}$ 은 활성영역의 물질과 구조에 따라 결정되는 양이다.  $l = 1.6\mu\text{m}$ 을 가지는 GaAs Gunn 다이오드의 경우, 4.6V보다 낮은 valley 전압이 예상됨과 동시에 이 peak 전압은  $R$ 에 관계없이 동일한 값으로 주어졌어야 할 것이다. 그림 7에서는 그 값이  $R$ 에 대해 아주 약간씩 증가함을 보이며, 이는 다이오드 설계와 공정상 변수들의 고찰이 필요할 것으로 보인다.

GGI 구조에서는 전자들이 큰 에너지를 가지고 활성영역으로 바로 이동하기 때문에 NDR의 기울기가 매우 작게 나타난다. GGI 때문에 대부분의 전자들은 활성영역에 도달 했을 때 이미 뜨거운 상태이며, 전자들은 바로 L 계곡으로 이동하게 되고, 이 계곡에서 전자들의 유동속도는 감소하게 된다. Gunn 다이오드의 유동속도(전류밀도)와 전기장(전압)의 관계는 온도, 전압변화 그리고 injector장벽의 높이에 의해 지배되는데, 일단 유동속도가  $v_{d, valley}$ 에 도달하여 그 크기가 감소한다는 것은 L 계곡의 점유도가 커졌음을 의미하고, 이때부터는 전자의 유동속도가 온도와 전기장의 변화에 덜 민감하게 된다. AlGaAs의 에너지 밴드 갭은 아래 식으로 주어지며<sup>[16]</sup>

$$E_g = 1.420 + 1.087x + 0.0438x^2 \quad (1)$$

Al = 0.3에서 약 0.25eV의 에너지를 가진 전자가 활

성영역으로 주입된다. 그림 8 에 전류밀도  $J$ 와 전압  $V$ 의 관계를 나타내었다. 본 연구에서 NDR 효과는  $V=4.6V$  이상에서 나타났으며, 그 기울기는 GGI Gunn 다이오드<sup>[10]</sup>가 보이는 것보다 상대적으로 크다. 그림 7 과 8의 결과들은 GGI GaAs Gunn 다이오드의 특성보다 conventional n+nn+ Gunn 다이오드의 NDR 특성을 더 잘 보여준다고 할 수 있다. 또한  $R$ 의 변화에 대해, valley 전압을 중심으로 높은 전압에서의 전류밀도는, 낮은 전압에서의 전류밀도 분포와 균일한 분포로 감소하지 않는다. 94GHz에서 고 출력, 고 효율을 가지는 GGI GaAs Gunn 다이오드에서 예측되는 NDR특성과 본 연구결과들의 차이는 설계, 공정, 그리고 측정상의 여러 변수뿐만 아니라, injector의 영향을 고찰해 봄으로써 알아 볼 수 있으리라 생각되며, 이 부분은 차후의 연구로 남긴다.

낮은 전기장이 가해질 때 Gunn 다이오드의 I-V 특성은 Ohm의 법칙을 따르고 대부분의 전자들은  $\Gamma$  계곡에 점유되어 있지만, 문턱 전기장 이상에서는  $\Gamma$  계곡과 L 계곡에서의 전자 점유도가 변하게 된다. 일반적으로 전기장과 전자 유동속도와와의 관계는 볼츠만 방정식이나 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있다. 그러나 이 작업은 매우 복잡하며 여기서는 아래의 알짜 전류밀도와 전자 점유도의 관계를 사용하여 cathode 반지름에 대해  $v_{d,peak}$ 와  $v_{d,valley}$ 들의 정성적인 특성변화를 알아보았다.

$\Gamma$ 와 L 계곡에 있는 전자들의 알짜 전류밀도는

$$J = nqv_d = n_{\Gamma}q\mu_{\Gamma}E + n_Lqv_{d,valley} \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 여기서,  $v_{d,valley}$ 는 충분히 큰 전기장이 존재할 때 L 계곡에 있는 전자들의 유동속도,  $n_{\Gamma}q$ 는 L 계곡으로 이동하기 전의 전자들이고  $n_Lq$ 는 L 계곡에 존재하는 전자들이다.  $n = n_{\Gamma} + n_L$ 에 대해 L에 있는 전자의 비율  $\xi(E) = \frac{n_L}{n}$ 이고, 이 값은 낮은 전기장에서 0, 높은 전기장에서 거의 1을 가진다. 식 (2)로부터 전자의 평균유동속도  $v_d$ 는

$$v_d(E) = \mu_{\Gamma}E - \xi(\mu_{\Gamma}E - v_{d,valley}) \quad (3)$$

이다. 본 연구에서는 유동속도의 정성적인 변화를 알아보기 위하여 (1) 식의  $v_d = \frac{J}{nq}$ 와 그림 8의 I-V 측정 결과들로부터  $R = 30\mu m \sim 40\mu m$ 에서  $v_{d,peak}$ 는

표 1.  $T = 300K$ 에서, 다른 cathode 반지름을 가진 GGI GaAs Gunn 다이오드의  $v_{d,peak}$ 와

$$v_{d,valley}, \text{ 그리고 } \frac{v_{d,peak}}{v_{d,valley}}$$

Table 1.  $v_{d,peak}$ ,  $v_{d,valley}$  and  $\frac{v_{d,peak}}{v_{d,valley}}$  of the GGI GaAs Gunn diode for different cathode radii at  $T = 300K$ .

종류	30 $\mu m$ 반경	32 $\mu m$ 반경	34 $\mu m$ 반경	36 $\mu m$ 반경	38 $\mu m$ 반경	40 $\mu m$ 반경
$v_{d,peak}$ ( $\times 10^7 cm/s$ )	0.89	0.84	0.79	0.74	0.70	0.67
$v_{d,valley}$ ( $\times 10^7 cm/s$ )	0.60	0.59	0.57	0.57	0.56	0.55
$\frac{v_{d,peak}}{v_{d,valley}}$	0.48	0.42	1.39	1.30	1.25	1.21

$0.89 \times 10^7 cm/s \sim 0.67 \times 10^7 cm/s$ 를  $v_{d,valley}$ 는  $0.60 \times 10^7 cm/s \sim 0.55 \times 10^7 cm/s$ 를 얻었다. 6개의 다른  $R$ 에서 최고유동속도  $v_{d,peak}$ , 계곡유동속도  $v_{d,valley}$ , 그리고  $\frac{v_{d,peak}}{v_{d,valley}}$ 의 결과들을 표 1에 나타내었다.

94GHz에서 동작하는 GaAs Gunn 다이오드의 경우, 높은 출력특성이 중요하며,  $25kA/cm^2$  이상의 전류밀도에서 동작되도록 설계된다. 그림 8 과 표 1 에서와 같이,  $R = 30\mu m \sim 40\mu m$ 에서  $J = 15.7 \sim 11.7(kA/cm^2)$ 의 보다 낮은 전류밀도와 평균유동속도를 얻었다. GaAs의 peak유동속도는  $1.5 \times 10^7 cm/s$  정도이다<sup>[7,11]</sup>. L 계곡의 전자 점유도가 변하면 전류밀도와 평균유동속도들이 변화한다. 낮은 전류밀도는 낮은 평균유동속도를 주며, 이는 본 연구에서 제작된 다이오드의 연구에 있어서, 출력과 효율 특성 향상을 위해 깊이 고찰되고 연구되어야 할 요소들이다. 높은  $v_d$ 는 transit-time의 감소와 함께 높은 주파수에서의 동작을 의미할 뿐더러 높은 출력전력을 얻는 조건 중의 하나이기도 하다.  $v_d$ 는 온도, 전기장, injector의 높이에 의해 영향을 받으면서 Gunn 다이오드의 주파수와 출력 특성에 영향을 준다. 따라서 Gunn 다이오드의 효율과 출력은 GGI의 설계뿐만 아니라 물질, 활성영역의 길이, 열 방출의 효과적인 처리 등과 밀접하게 관련된다. 80~100 GHz의 밀리미터파 대역에서 동작하는 발진기의 효율은 매우 낮는데, 이 효율은 valley전류에 대한 peak전류의 비에 의존한

다. 즉, 효율은 peak전류에서의 평균유동속도에 비례하고, 이것은 또한 NDR에 비례한다. 이상적인 square wave 경우, 해석적으로 Gunn 소자의 sine wave 동작을 가정하고 정성적으로 효율 특성을 고찰 할 수 있다<sup>[7]</sup>. 여기서 Gunn 다이오드의 효율  $\eta$ 는

$$\eta = \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \left( \frac{I_{peak} - I_{valley}}{I_{peak} + I_{valley}} \right) \left( \frac{V_{valley} - V_{peak}}{V_{valley} + V_{peak}} \right) \quad (4)$$

으로써,  $I_{peak}$ 와  $V_{valley}$ 가 클수록,  $I_{valley}$ 와  $V_{peak}$ 는 작을수록 좋은 효율특성을 짐을 알 수 있다. GaAs에서 최고 효율은  $I_{peak}/I_{valley}$ 가 2 일 때이며, 본 연구에서 제작된  $R = 30\mu m$ 의 GaAs Gunn 다이오드에서 peak전류와 valley전류의 비는 약 1.5 이었다. 이것은 표 1에 주어진 peak/valley 유동속도의 비와 또한 관련된다.

우리는 제작된 planar 형태의 GaAs GGI Gunn 다이오드 소자의 DC 측정을 통하여 성공적인 GaAs Gunn 다이오드의 제작을 확인함과 동시에 Gunn 다이오드 소자로서의 역할 수행 가능성을 알아보았다. 보고된 GGI GaAs Gunn 다이오드의 연구<sup>[9,10]</sup>들로부터 예측된 valley 전압(또는 peak 전류) 그리고 NDR 기울기 등이 우리가 제작한 Gunn 다이오드로 부터 얻은 결과와 차이가 있음을 관측하였다. 위의 차이들은 planar 소자 구조의 설계, 공정상의 고찰 통하여 향상된 결과를 얻을 수 있으리라 예측한다.

## V. 결 론

Planar 형태의 94GHz GGI GaAs Gunn 다이오드 소자를 설계, 제작하고 6개의 다른 cathode 반지름에서 I-V 특성을 해석하고 부정저항특성을 알아보았다. 본 연구에서 수행한 측정결과들을 바탕으로 유동속도, 전류밀도, peak전류와 전압 그리고 valley전류들을 94GHz에서 동작하는 GaAs Gunn 다이오드 소자에서 예측되는 특성들과 비교, 논의하였다. 94GHz GaAs Gunn 다이오드제작에 있어서, 위의 인자들과 설계 및 공정상 변수들의 관계 고찰이 다음의 연구로 이어질 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. K. Ridley and T. B. Watkins, "The possibility of negative resistance effects in semiconductors," Proc. Phys. Soc. Lond., Vol. 78, pp. 293, 1961.
- [2] C. Hilsum, "Transferred electron amplifiers and oscillators," Proc. IRE., Vol. 50, pp.185, 1962.
- [3] J. B. Gunn, "Microwave oscillation of current III-V semiconductors," Solid State Comm., Vol. 1, pp. 88, 1963.
- [4] W. Watanabe, T. Deguchi, and A. Nakagawa, "V-band planar Gunn oscillators and VCOs on AlN substrates using flip-chip bonding technology," IEEE MTT-S Digest, pp.13-16, 1999.
- [5] A. Nakagawa, K. Watanabe, T. Yoshida, T. Deguchi, and Y. Oki, "77GHz planar Gunn VCOs on AlN substrates using novel flip-chip InP Gunn diodes," IEEE MTT-S Digest, pp.1205-1208, 2000.
- [6] S. Sze, Semiconductor devices. Physics and Technology, Wiley, New York, 1985.
- [7] P. T. Bulman, G. S. Hobson, and B. C. Taylor, Transferred Electron Devices, Academic Press, London and New York, 1972.
- [8] S. Hutchinson, J. Stephens, M. Carr, M. J. Kelly, "Implant isolation scheme for current confinement in graded-gap Gunn diodes," Electron Lett. Vol 32, pp.851, 1996.
- [9] NR Couch, PH Beton, MJ Kelly, DJ Knight, and J Ondria, "The use of linearly graded composition AlGaAs injectors for intervalley transfer in GaAs: theory and experiment," Solid-State Electron. Vol. 31, No 3-4, pp. 613-616, 1988.
- [10] Simone Montanari, Arno Forster, Mihail Ion Lepsa, and Hans Luth, "High frequency investigation of graded gap injectors for GaAs Gunn diodes," Solid-State Electron Vol. 49, pp. 245-250, 2005.
- [11] T. W. Hickmott, P. M. Solomon, R. Fischer, and H. Morkoc, "Negative charge, barrier heights, and the conduction-band discontinuity in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As capacitors," J. Appl. Phys, Vol. 57, pp. 2844-2853, 1985.
- [12] Phillip D. Blais, "Edge acuity and resolution in positive type photoresist systems," Solid State Technology, Vol. 20, pp. 76-85, 1977.
- [13] Il-Hyung Lee, Sang-Myung Kim, Kwan-Ki Youn, Seok-Hyun Shin, and Jin-Koo Rhee, "The fabrication of a sub-micro gate using IR process", proceedings on KITE Fall Conference, pp.356-358, 1992.
- [14] M. A. Harry, M. J. Kelly, G. M. Dunn, M. J. Kearney, J. Stephens, and M. Carr, "The free-space oscillation of heterojunction GaAs/ AlGaAs Gunn diodes as a design guide," Semicond. Sci. Technol. Vol. 14, pp. L19-L20, 1999.

[15] E. Alekseev and D. Pavlidis, "Microwave potential of GaN-based Gunn devices," Electronics Letters Vol. 36, No. 2, pp.176-178, 2000.

[16] O. Madelung, Semiconductors-basic data, Springer, Berlin, 1996.

저 자 소 개



김 미 라(정회원)  
 1988년 동국대학교 물리학과 학사 졸업.  
 1991년 한양대학교 물리학과 석사 졸업.  
 1998년 한양대학교 물리학과 박사 졸업.

현재 밀리미터파 신기술 연구센터 연구교수  
 <주관심분야 : 반도체, 응집물리>



이 성 대(정회원)  
 1998년 동국대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 2000년 동국대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 2006년 동국대학교 전자공학과 박사 졸업.

현재 밀리미터파 신기술 연구센터 연구원 (Post Doc.)  
 <주관심분야 : 화합물 반도체, 밀리미터파 대역용 MEMS 및 MMIC>



채 연 식(정회원)  
 1993년 동국대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 1997년 동국대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 2002년 동국대학교 전자공학과 박사 졸업.

현재 밀리미터파 신기술 연구센터 연구교수  
 <주관심분야 : 화합물 반도체, 밀리미터파 대역용 MMIC 및 시스템>



이 진 구(정회원)  
 1969년 국립항공대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 1975년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업  
 1982년 Oregon State University 전기공학과 박사 졸업

1985년 Cray Research, USA, Research Scientist  
 1985년 Microwave Semiconductors, USA, Senior Engineer  
 1990년~1991년 University of Michigan, Visiting Research Scientist  
 1999년~현재 대한전자공학회 상임이사  
 1995년~현재 한국 전자과학회 이사  
 1996년~현재 한국산업인력관리공단, 기술사  
 김정 심의위원  
 2005년 대한전자공학회 회장  
 2005년~2006년 동국대학교 공과대학 및 정보산업대학 학장  
 1985년~현재 동국대학교 공과대학 전자공학과 교수  
 1999년~현재 밀리미터파 신기술 연구센터 소장  
 <주관심분야 : 밀리미터파 대역용 반도체 소자, MMIC 및 시스템>