

## HEMT 소자 공정 연구

## (Part II. HEMT 구조에서의 Ohmic 접촉저항)

## A Study on HEMT Device Process

## (Part II. Ohmic Contact Resistance in GaAs/AlGaAs Hetero-Structure)

李 鍾 覽\*, 李 載 珍\*, 朴 盛 鎬\*, 金 鎮 燮\*, 馬 東 星\*

(Jong Lam Lee, Jae Jin Lee, Sung Ho Park, Jin Sup Kim, and Dong Sung Ma)

## 要 約

HEMT 구조와 MESFET 구조에서의 specific 접촉저항과 미세구조 변화를 조사하여 두 구조에서의 ohmic 접촉경향을 비교하였다. Ohmic 금속재료로는 Au-Ge-Ni을 사용하였고, 열처리 온도는 330°C에서 550°C까지 변화시켰다. HEMT 구조에서의 최소 접촉저항은 MESFET 구조에서보다 60K 높은 온도에서 열처리할 때 나타났다. MESFET 구조에서 NiAs(Ge)의 부피분율은 열처리 온도나 열처리 시간에 따라 증가하였으며, 이 NiAs(Ge)은 ohmic 금속화 처리의 초기상태에서 접촉 저항을 낮추는 역할을 하였다. 반면에, HEMT 구조에서 NiAs(Ge)의 부피분율은 열처리 온도나 열처리 시간에 무관하게 변화하였으며, 아울러 ohmic 접촉저항의 변화에 무관한 경향을 보였다. 따라서 HEMT 구조에서의 ohmic 접촉현상은 NiAs(Ge)의 생성보다는 이차원 전자가스층까지의 운반자 활성화원소인 Ge 확산에 의해서 해석될 수 있었다.

## Abstract

The ohmic contact behavior in HEMT structure was compared with that in MESFET one throughout the specific contact resistance and microstructural change in both structures. A Au-Ge-Ni based metallization scheme was used and the alloying temperature of the ohmic materials was changed from 330°C to 550°C. The alloying temperature to obtain the minimum specific contact resistance in HEMT structure was 60K higher than that in MESFET. The volume fraction of NiAs(Ge) in MESFET structure increases with alloying temperature and/or the alloying time, which makes the decrease of specific contact resistance at the initial stage of ohmic metallization. In contrast, the volume fraction of NiAs(Ge) in HEMT structure was not dependent upon the specific contact resistance, which implies that the ohmic contacts are dominantly formed by the Ge diffusion to 2-DEG (two dimensional electron gas) layer.

\*正會員, 韓國電子通信研究所 化合物半導體硏究部  
(Compound Semiconductor Department, ETRI)

接受日字: 1989年 7月 18日

(※ 본 연구결과는 '88년도 과학기술처 특정연구비로 수행한 연구결과의 일부임.)

## I. 서 론

화합물 반도체의 집적회로 개발시 집적도가 증가됨에 따라서 소오스와 드레인의 형성시 발생하는 ohmic 접촉저항은 소오스 저항 및 드레인 저항에 큰 영향

을 미치게 된다. 특히 AlGaAs/GaAs의 이중 접합구조로 형성되는 HEMT(High Electron Mobility Transistor)소자의 경우, 소오스 저항에 큰 영향을 주는 ohmic 접촉저항은 트랜스컨덕턴스(transconductance) 등 소자성능에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되어 왔다.<sup>(1)</sup>

N-GaAs를 기판으로 사용하는 MESFET(Metal Semiconductor Field Effect Transistor)을 제작하기 위한 ohmic 재료로는 지금까지 가장 우수한 특성을 나타내는 것으로 보고된 AuGe(88 : 12)/Ni 등이 주로 사용되어 왔다. Murakami 등<sup>(2,3)</sup>은 AuGe/Ni/Au 등을 진공증착시킨 후 열처리 하였을 때, 계면에 NiAs(Ge)상 및  $\beta$ -AuGe상이 형성되는 것을 단면 전자현미경을 통해 관찰하였으며, 이때 형성된 NiAs(Ge)은 As의 방출(out diffusion)을 억제시켜, ohmic 접촉의 재현성을 향상시킨다고 보고하였다. Kuan 등<sup>(4)</sup>은 적절한 열처리시  $Ni_2GeAs$ 상이 형성되며, 이 상의 경계를 따라 Ge의 확산이 빠르게 진행되어  $Ni_2GaAs/GaAs$ 계면에  $N^+$ -GaAs층이 형성되기 때문에 ohmic 접촉저항이 낮아진다고 보고하였다.

HEMT소자의 경우 GaAs/AlGaAs 계의 ohmic 접촉저항을 낮추기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. Hong 등<sup>(5)</sup>은 AlGaAs/GaAs 계 및 InAlGaAs/InGaAs계에 Ni/Ge/Au/Ni/Ti/Au 등의 다층 금속막을 형성시킨 후, 2 단계 금속열처리를 통하여 낮은 접촉저항을 얻었다. Zwicknagl 등<sup>(6)</sup>은 AuGeNi/Ag/Au를 이용하여 MESFET 구조에서 보다 100-150K 정도 높은 온도에서 최소 접촉저항을 얻었으며 Ag는 열처리 도중 Au와 반응하여 Ag/Au 합금으로 형성되어 Ga의 방출을 억제한다고 보고 하였다.

Goronkin 등<sup>(7)</sup>은 GaAs/AlGaAs계에서 NiGaAs 상을 단면 전자현미경을 통하여 관찰하였으며, MESFET의 경우보다 NiGeAs 상을 단면 전자현미경을 통하여 관찰하였으며, MESFET의 경우보다 NiGeAs 상의 크기가 작고, 더 균일하게 분포 되어 있는 것을 관찰하였다. 따라서 HEMT 구조내에 존재해 있는 AlGaAs층이 NiGeAs 상의 침투를 억제시킨다고 보고 하였다.

MESFET와 HEMT 구조의 ohmic 접촉 형성시 다음과 같은 두가지 차이점을 보이고 있다.

첫째, HEMT 구조에서 최소 ohmic 접촉저항을 얻기 위해서는 MESFET 구조에서 서보다 60-150K 정도 높은 온도에서 열처리하여야 한다는 점이다. 이것은 AlAs이나 AlGa의 화학결합이 GaAs보다 크기 때문이라고 해석되어 왔다.<sup>(8)</sup>

둘째, NiAs(Ge)이나  $Ni_2GeAs$  등과 같은 화합물

이 MESFET의 ohmic 접촉형성시 매우 중요한 역할을 한다는 데 의견의 통일을 보이고 있으나, 화합물들이 HEMT 구조에서 ohmic 접촉의 형성에 미치는 영향은 불분명한 상태로 남아있다. 특히 MESFET 구조에서 위의 화합물이 GaAs와 접촉시 장벽크기를 낮춤으로써 ohmic 접촉저항이 감소하는지, 아니면 위의 화합물 밑에 형성된  $N^+$ -GaAs층에 의하여 ohmic 접촉저항이 감소하는지에 대해서도 불분명한 상태로 남아 있다.

따라서 본 연구에서는 HEMT 및 MESFET 구조에 Au-Ge-Ni계의 ohmic 금속을 형성시킨 후 열처리에 의해 형성되는 각 상의 구조 및 부피분율을 결정하여, 이것이 각 구조에서 ohmic 접촉저항에 미치는 영향을 조사하였다. 또 ohmic 접촉 모델을 이용하여, 금속/GaAs계면에서의 Ge 농도를 결정하고, 이것이 ohmic 접촉저항에 미치는 영향을 조사함으로써, HEMT 및 MESFET 구조에서의 ohmic 접촉 형성기구에 대하여 논하였다.

## II. 실험

본 연구에서는 MESFET 구조와 HEMT 구조에서의 ohmic 접촉저항 변화를 조사하기 위하여 다음과 같은 두 종류의 시편을 사용하였다. MESFET 구조의 시편은 도핑되지 않은 GaAs에  $3 \times 10^{13}/cm^2$ 의 Si를 120keV의 에너지로 주입시킨 후 820°C에서 20분 동안 활성화시켜 준비되었다. 분자선 에피택시(Molecular Beam Epitaxy) 방법을 이용하여 n-GaAs(200Å)/i-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As(400Å)/n-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As(400Å)/i-Al<sub>0.3</sub>-Ga<sub>0.7</sub>As(100Å)/i-GaAs(7000Å)의 구조를 갖는 HEMT 구조의 시편을 성장시켰으며, 이때 도핑농도는  $1 \times 10^{18} Si/cm^3$ 이었다.

이와 같은 기판위에 lift-off를 위한 overhang 구조의 감광막을 형성하기 위하여, Shipley 1400-27 감광막을 HEMT 구조의 에피층 위에 1.1μm의 두께로 도포시킨 후, 64°C로 유지된 오븐에서 15분 동안 softbake를 하고, monochlorobenzene에 담그어서 감광막의 표면을 경화시켰다.

크롬마스크를 통해 선택적으로 노광시킨 다음, MF 354 현상용액에서 70초 동안 현상시켜 overhang 구조를 형성시켰다.

Ohmic 접촉저항을 결정하기 위하여, 열증착기를 이용하여 AuGe(1500Å)/Ni(500Å)/Au(2000Å)을 TLM(transmission line method) 패턴이 형성된 기판위에 증착시켰다. 이때 Auger 스펙트럼에 의한 각 금속 원소의 깊이분포 및 X-선 회절분석을 통해 ohmic 접촉 형성과정 중 상변태(phase transformation) 현

상을 조사하기 위하여, 패턴이 형성되지 않은 기판 위에도 ohmic 물질을 증착시켰다. 열증착시키기 전의 증착기의 진공도는  $7 \times 10^{-6}$  Torr 이었고, 증착된 금속층의 두께는  $\alpha$ -step으로 측정하였다.

그림 1-(a)는 overhang 구조의 감광막위에 AuGe/Ni/Au를 열증착시킨 후 SEM(scanning electron microscope)으로 관찰된 시편의 단면사진이다. 감광막의 측면 벽과 금속층이 서로 분리되어 있었으며 따라서 감광막 위에 증착된 금속을 아세톤과 같은 감광막을 용해 시킬 수 있는 용매를 사용하여 lift-off 방법으로 쉽게 제거할 수 있었다(그림 1-(b)).

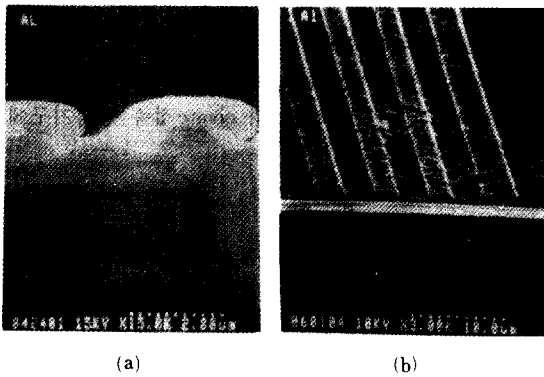


그림 1. Overhang 구조위에 증착된 금속의 단면사진  
(a) lift-off 전 (b) lift-off 후  
Fig. 1. Cross-sectional view of metal layer deposited on overhang structure.  
(a) before lift-off. (b) after lift-off.

Ohmic 접촉저항의 열처리 온도에 대한 의존성을 조사하기 위하여 열증착된 시편을 330°C와 550°C 사이의 온도 범위에서 각각 10분 동안  $N_2$  분위기로 열처리 시켰다. 열처리 시간에 따른 ohmic 접촉저항의 변화를 알아보기 위하여 온도 426°C와  $N_2$  분위기 아래에서 각각의 시편을 1.5분에서 100분 사이로 열처리 시켰다. 이와같이 열처리된 시편은 4-point probe 방식에 의한 transmission line method(TLM)를 이용하여 ohmic 접촉저항을 결정하였다.

각 시편의 ohmic 열처리 도중 일어나는 상변태 현상 및 각 상의 구조 등은 X-선 회절법으로 조사되었다. 이때 사용한 X-선 장치는 monochromator 가 장착된 Rigaku사 제품으로 40kV 및 120mA의 입사 에너지를 사용하였고, X-선 소오스로 Cu타겟( $\lambda = 1.542\text{\AA}$ )을 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. Ohmic 접촉저항의 변화

그림 2는 HEMT 및 MESFET 구조에서의 ohmic 열처리를 10분 동안 할 때, 열처리 온도에 따른 ohmic 접촉저항의 변화이다. MESFET 구조에서의 ohmic 접촉저항은 420°C까지 열처리 온도에 따라 급격히 감소한 후, 다시 서서히 증가 되었으며, 최소 접촉저항값은 420°C에서 열처리된 시편에서  $6.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 측정되었다. HEMT 구조를 가진 시편의 ohmic 접촉저항에 대한 온도 의존성은 MESFET 구조의 경우와 같은 경향을 보였으나, 단지 최소 접촉저항이 MESFET 구조의 경우보다 60°K 정도 더 높은 온도쪽으로 이동하였다. 그리고 HEMT 구조에서의 최소 접촉저항 값은 MESFET 구조에 비해 약 20배 정도 더 큰 값인  $1.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 측정되었다.

그림 3은 HEMT 및 MESFET 구조에서 426°C의 열처리 시, 열처리 시간에 따른 ohmic 접촉저항의 변화이다. 열처리 시간이 길어짐에 따라 ohmic 접촉저항은 급격히 감소하였으며, 열처리 시간이 10분일 때 최소값을 이룬 후, 다시 서서히 증가하였다. 이상과 같이 열처리 시간 및 열처리 온도에 따라서, ohmic 접촉저항은 아래쪽으로 오목한 형태를 보였다.

그림 2에서 HEMT 구조에서의 최소 접촉저항을 나타내는 온도가 고온쪽으로 이동하는 현상을 설명하면 다음과 같다. MESFET 구조의 경우, 채널층은 ohmic 금속층의 바로 밑에 존재하기 때문에 낮은 열

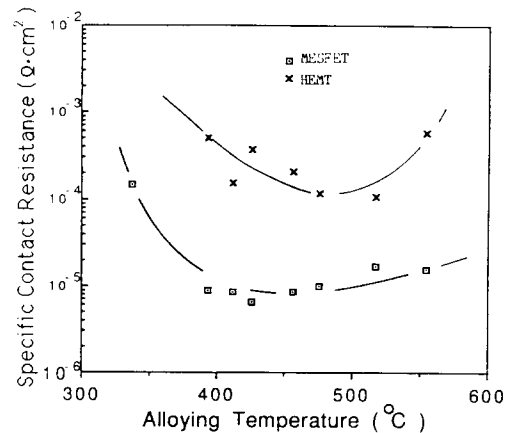


그림 2. HEMT 구조와 MESFET 구조에서 접촉비저항의 온도 의존성  
Fig. 2. Specific contact resistance as a function of alloying temperature in HEMT and MESFET structures.

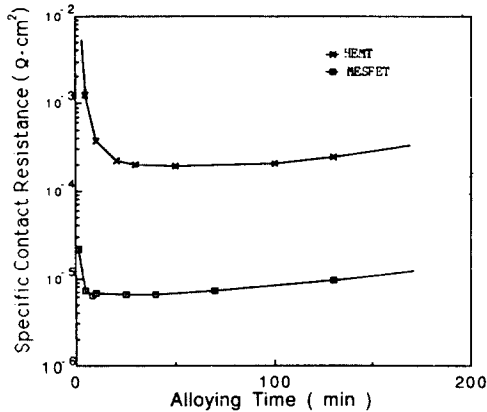


그림 3. HEMT 구조와 MESFET 구조에서 열처리 시간에 따른 ohmic 접촉저항의 변화

Fig. 3. Specific contact resistance as functions of alloying time in HEMT and MESFET structures.

처리 온도 및 짧은 열처리 시간에 의해서 ohmic 금속화 반응이 일어날 수 있다. 반면에 HEMT 구조에서는 채널층인 2-DEG (two-dimensional electron gas) 층이 ohmic 금속층으로부터 아래쪽 방향으로  $1100\text{\AA}$  깊이에 존재하기 때문에 ohmic 활성화 원소인 Ge이 2-DEG 층에 도달하기 위해서는 더 높은 열처리 온도 및 더 긴 열처리 시간을 필요로 한다.<sup>(8)</sup> 그림 4는 이와같은 설명을 뒷받침한다. HEMT 구조의 시편과 MESFET 구조의 시편을  $426^\circ\text{C}$  에서 각각 1.5 분 열처리한 후,  $I-V$  측정을 하였을 때, MESFET 구조의 시편은 ohmic 접촉이 형성된 반면, HEMT 구조의 시편은 ohmic이 형성되지 않고, Schottky 특성을 보였다. 그런데 이것을 더 긴 시간인 5분동안 열처리 하였을 때, 그 특성이 Schottky 특성에서 ohmic 특성으로 변환 하였다. 이것은 HEMT 구조의 ohmic 접촉을 형성하기 위해서는 Ge 등과 같은 ohmic 형성용 금속이 2-DEG 층에 도달하여야 하는 이른바 열적 활성화 반응 (thermally-activated process) 을 필요로 한다는 것을 간접적으로 증명한다.

그림 5는 HEMT 구조의 시편을 서로 다른 온도에서 ohmic 열처리시킨 후, 각 원소의 Auger 깊이분석 결과이다. 시편위에 증착된 금속층을  $394^\circ\text{C}$  에서 10 분동안 열처리시킨 결과, ohmic 형성원소인 Ge은 기판내부로 확산하지 않고 거의 모두가 증착된 상태로 존재하였다. 이것은 낮은 온도에서 ohmic 열처리하였을 때, ohmic 접촉저항이 그림 2와 같은 큰 값을

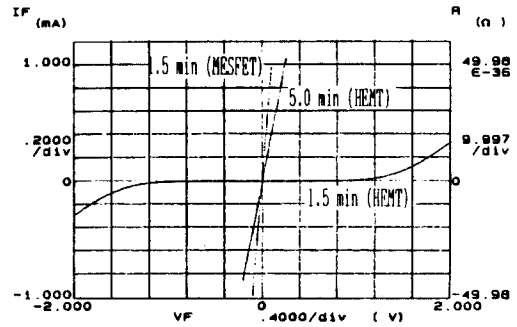


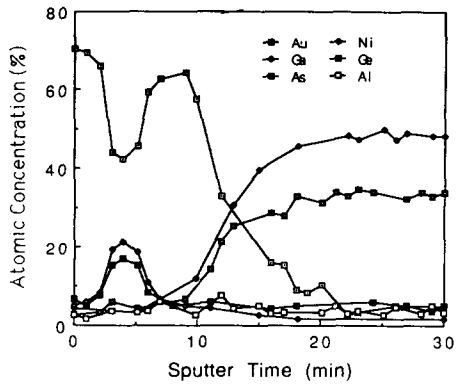
그림 4. HEMT 구조와 MESFET 구조에서의  $I-V$  특성

Fig. 4.  $I-V$  characteristics in HEMT and MESFET structures.

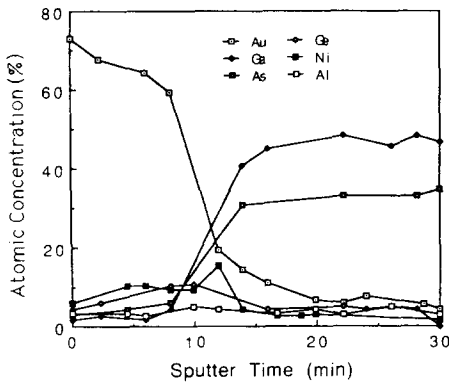
같은다는 것을 뒷받침한다. ohmic 금속층을  $457^\circ\text{C}$  에서 열처리하였을 때, ohmic 형성원소인 Ni 및 Ge은 기판내부로 확산하였으며, 아울러 ohmic 접촉저항은  $394^\circ\text{C}$  에서 열처리하였을 때 보다 크게 감소하였다. Ohmic 열처리를 더 높은 온도인  $554^\circ\text{C}$  에서 하였을 때, ohmic 금속들이 기판내부로 깊숙히 확산하였으며, 동시에 많은 양의 Ga와 As이 ohmic 금속층으로 확산하였다. 따라서 그림 2에서 보여주는 바와 같이 ohmic 접촉저항은 큰 값을 보였다.

## 2. X-선 측정분석

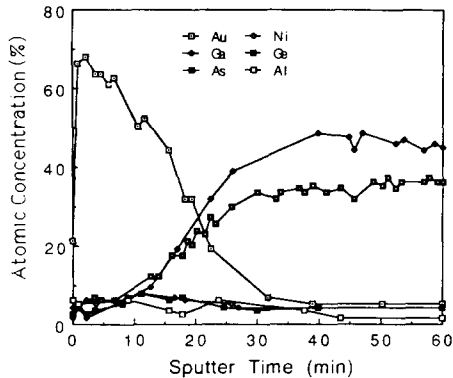
MESFET 및 HEMT 용 시편을  $457^\circ\text{C}$  와  $517^\circ\text{C}$  에서 열처리시킨 후, X-선 회절분석시킨 결과를 그림 6에 나타내었다. X-선 회절 분석결과  $457^\circ\text{C}$  의 열처리 시 생성된 상은 fcc (face centered cubic) 구조였으며, 각 (hk1) peak으로 부터 구한 격자상수는 4.075로 결정되었으며, 이 값은 순수한 Au의 격자상수보다 0.09% 작은 값이었다. Kin 등<sup>(9)</sup>은 GaAs 위에 Ge의 농도를 0-12% wt. 변화시킨 AuGe 층을 진공증착시킨 후 열처리하였을 때,  $350^\circ\text{C}$  이하의 온도에서 일반적으로  $\alpha$ -AuGa로 보고있는 Au의 풍부한 고용체가 형성되며, 이것의 격자상수는 순수한 Au보다 0.05% 이상 작게 나타난다고 보고하였다. 또한 Au가 풍부한 고용체 (Au-rich solid solution) 는 Au-Ga-Ge의 3상 고용체라고 보고하였다. 그런데 본 연구에서는 ohmic 증착재료로 Ni도 사용하였으므로  $\alpha$ -AuGa 내에는 Ge뿐만 아니라 Ni도 고용되었으리라 생각된다. Hexagonal 구조를 갖는  $\text{Au}_7\text{Ga}_3$  ( $\beta$ -GaAs) 상은  $500^\circ\text{C}$  이상 열처리할 때 관찰되었다. 반면 hexagonal 구조 NiAs (Ge) 상은 낮은 열처리 온도



(a)



(b)



(c)

그림 5. HEMT 구조에서 열처리 조건에 따른 Auger 깊이분석

(a) 394°C (b) 457°C (c) 554°C

Fig. 5. Auger depth profiles with alloying conditions in HEMT structure.

(a) 394°C. (b) 457°C. (c) 554°C.

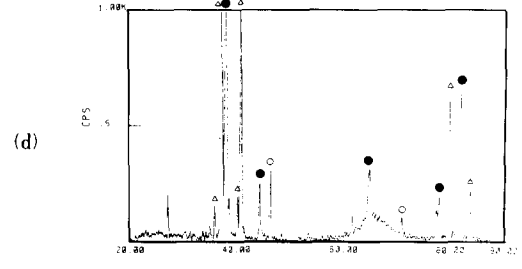
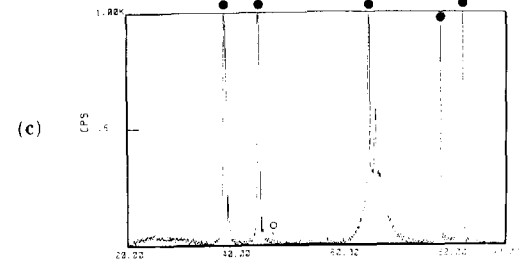
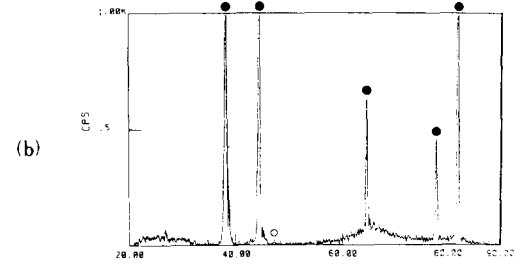
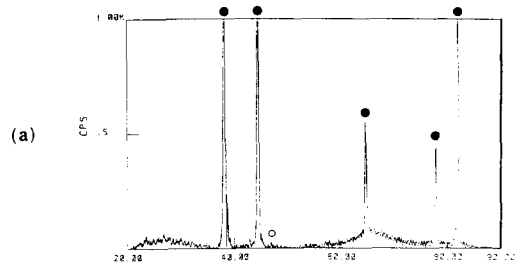


그림 6. HEMT 구조와 MESFET 구조의 alloying 열처리 후의 X-선 회절분석  
(○ : NiAs(Ge), △ : α-AuGa, □ : β-AuGa)

(a) 457°C 10분, HEMT 구조  
(b) 517°C 10분, HEMT 구조  
(c) 457°C 10분, MESFET 구조  
(d) 517°C 10분, MESFET 구조

Fig. 6. X-ray diffraction patterns in HEMT and MESFET structures after alloying treatment.

(○ : NiAs(Ge), △ : α-AuGa, □ : β-AuGa)  
(a) 457°C for 10min, HEMT structure.  
(b) 517°C for 10min, HEMT structure.  
(c) 457°C for 10min, MESFET structure.  
(d) 517°C for 10min, MESFET structure.

에서 부터 형성되었다. 여기에서 본 연구에서, 쏘점을 둔 NiAs(Ge)상의 부피분율은 열처리시간이 길어질수록 연속적으로 증가하였다.

그림 7은 NiAs(Ge)상의 부피분율과 ohmic 접촉저항과의 관계이다. NiAs(Ge)상의 부피분율이 증가함에 따라 ohmic 접촉저항은 급격히 감소하였고, 그 후, 서서히 증가하는 경향을 보였다.

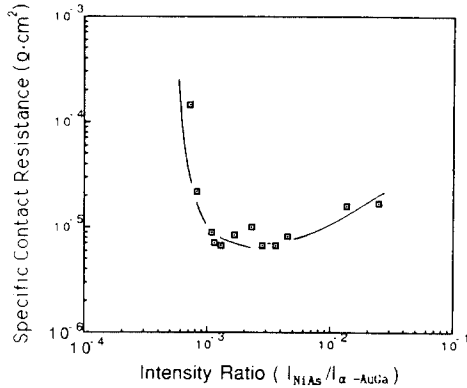


그림 7. MESFET구조에서 NiAs(Ge)의 부피분율에 따른 ohmic 접촉저항의 변화

Fig. 7. Variation of specific contact resistance with volume fraction of NiAs(Ge) in MESFET structure.

HEMT구조 시편의 경우, 554°C의 온도까지 열처리 온도에 따라 NiAs(Ge)상의 부피분율은 변화하지 않았으며, 그림 6과 같이 516°C의 열처리온도에서도  $\beta$ -AuGa peak은 관찰되지 않았다. 아울러 ohmic 접촉저항은 NiAs(Ge)의 부피분율의 크기에 관계없이 변화하였다. 이와같은 사실은 HEMT구조와 MESFET구조에서의 ohmic 접촉 형성기구가 다르다는 것을 암시한다.

Rai 등<sup>(10)</sup>은 GaAs/AlGaAs의 HEMT구조위에 Au/Ge/Ni의 ohmic 재료를 증착시키고 ohmic 열처리를 시킨 후, 단면 전자현미경을 통하여 Ni<sub>2</sub>GeAs, 혹은 NiAs(Ge)상이 금속/N<sup>+</sup>-GaAs 계면과 2-DEG층 사이에 형성되는 것을 관찰하였다. 이것은 AlGaAs 층에서 AlAs의 화학결합이 GaAs보다 강하여 ohmic 형성원소인 Ge 및 Ni의 확산을 억제시키며, 따라서 NiAs(Ge)상이 2-DEG층에 형성되는 것을 방해하기 때문으로 해석되었다.

본 연구에서도 이와같은 현상은 관찰되었다. HEMT구조에서의 최소 접촉저항이 나타나는 열처리 온도가 MESFET구조에서 보다 60°K 높은 온도에서 나타난 것은(그림 2) AlGaAs층이 Ni이나 Ge의 확산을 방해하고 NiAs(Ge)상의 형성을 억제하였기 때문으로 생각할 수 있으며, 이같은 사실은 NiAs(Ge)상의 부피분율이 MESFET 경우와는 달리 열처리 온도에 관계없이 일정한 값을 갖는다는 것으로도(그림 6, 그림 7) 뒷받침된다.

따라서 HEMT구조에서의 ohmic 접촉은 운반자 활성화 원소인 Ge이 2-DEG층까지의 확산에 의해서 형성될 수 있으며, 이때 ohmic 접촉저항의 크기는 2-DEG층까지의 Ge의 농도 및 활성화에 의해서 결정될 것이다. 한편, MESFET구조의 경우, ohmic 접촉 초기에(본 연구에서의 330°C - 420°C) 금속/N-GaAs계면에 NiAs(Ge)상이 형성됨으로써 ohmic 접촉저항은 급격히 감소하게 되며, 더 높은 열처리 온도에서 ohmic 접촉저항이 서서히 증가하는 것은 ohmic 접촉금속 내에 포함되어 있는 Ge원자가 연속적으로 N-GaAs내로 확산함으로써, ohmic 접촉 금속 밑의 활성화층에서의 Ge농도가 감소하기 때문으로 해석할 수 있다. 이와같이 Ge의 확산이 ohmic 접촉저항에 미치는 영향을 구체화하기 위하여 다음과 같은 model을 제시하였다.

### 3. Ohmic 접촉 모델

금속/N-GaAs ohmic 접촉시, ohmic 금속층 운반자를 제공하는 원소가 alloying 열처리중 GaAs표면 부위에 확산하여 N<sup>+</sup>층을 형성한다. 따라서 conduction band diagram은 그림 8과 같이 표현할 수 있다. 그림 8-(a)와 (b)는 각각 alloying 열처리 전과 후의 conduction band diagram이다. 그림 8-(b)의 경우, 금속으로 부터 반도체로의 carrier 흐름은 금속과 큰 농도로 도핑된 N<sup>+</sup>영역과 N-GaAs사이에 존재하는 장벽  $\phi_2$  (high-low barrier)에 의하여 영향을 받는다. N<sup>+</sup>층은 degeneration된 상태로 존재하기 때문에  $\phi_s$ 를 통한 전자의 흐름은 tunneling model로 설명할 수 있고, high-low barrier에서의 전자흐름은 thermionic emission model로 설명할 수 있다. 따라서 그림 8-(b)와 같이  $N_D < N_C$ 인 경우, 총 접촉저항은  $R_C$ 는 tunneling장벽에 의한 저항  $R_t$ 와 high-low장벽에 의한 저항인  $R_h$ 의 합으로 표현된다.

$$R_C = R_t + R_h \quad (1)$$

여기에서 tunneling 장벽저항  $R_t$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(11)</sup>

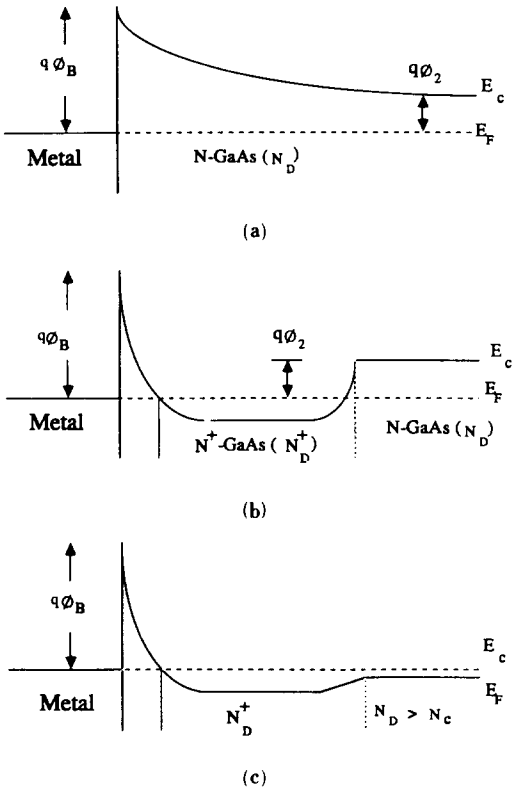


그림 8. 금속/N-GaAs의 접촉시 band diagram  
 (a) alloying 전 (\$N\_D < N\_C\$)  
 (b) alloying 후 (\$N\_D < N\_C\$)  
 (c) alloying 후 (\$N\_D > N\_C\$)

Fig. 8. A band diagram at an interface of metal/  
 N-GaAs.  
 (a) before alloying treatment (\$N\_D < N\_C\$).  
 (b) after alloying treatment (\$N\_D < N\_C\$).  
 (c) after alloying treatment (\$N\_D > N\_C\$).

$$R_t = \left[ \frac{A\pi q}{kT \sin(\pi c_1 kT)} \exp\left(\frac{-\phi_B}{E_{\infty}}\right) - \frac{AC_1 q}{(c_1 kT)^2} \exp\left(\frac{-\phi_B}{E_{\infty}} - C_1 \mu_F\right) \right]^{-1} \quad (2)$$

식(2)에서 \$E\_{\infty}\$, \$A\$, \$C\_1\$은 다음과 같이 주어진다.

$$E_{\infty} = \frac{qh}{2} \left( \frac{N_D^+}{m^* \epsilon_s} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$A = \frac{4\pi m^* q (kT)^2}{h^3} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{1}{2E_{\infty}} \ell_n \left[ \frac{A\phi_B}{\mu_F} \right] \quad (5)$$

윗 식들에서 \$\mu\_F\$는 bias를 가했을 때 전도대와 Fermi level 사이의 전위차를 의미한다.

즉, 전도층의 도핑농도가 증가할수록 \$E\_{\infty}\$를 증가시키며 따라서 식(2)의 \$R\_t\$는 작은 값을 보이게 된다.

High-low barrier에서의 전자흐름은 thermionic emission 모델인 식(6)로 설명할 수 있다.

$$J = A^* T^2 \exp(-\phi_2/kT) \exp(gV/kT) \quad (6)$$

High-low 장벽저항은 식(6)로부터 얻을 수 있다.

$$R_n = \frac{dV}{dJ} \Big|_{V=0} = \frac{k}{A^* q T} \exp(\phi_2/kT) \quad (7)$$

Boltzmann분포 함수에 의하면,

$$N_D = N_C \exp\left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT}\right] \quad (8)$$

그림 8-(b)에서

$$\phi_2 = E_c - E_F \quad (9)$$

식(9)을 식(7)과 (8)에 대입한 후 정리하면,

$$R_n = \frac{k}{qA^* T} \cdot \frac{N_C}{N_D} \quad (10)$$

즉, high-low 장벽의 경우, 접촉저항은 전도층의 농도 \$N\_D\$에 무관함을 알 수 있다.

\$N\_D = N\_C\$인 경우, 식(9)의 \$\phi\_2\$는 0으로 접근하므로 \$N\_D \le N\_C\$인 경우, 총 접촉저항 \$R\_c\$는 식(11)와 같이 \$R\_t\$에만 의존하게 된다.

$$R_c = R_t \quad (11)$$

즉, \$N\_D < N\_C\$인 경우, \$R\_c\$는 식(1)과 같이 high-low 장벽저항 \$R\_n\$ 및 tunneling 저항 \$R\_t\$에 의해서 변화하며, \$N\_D \ge N\_C\$인 경우, \$R\_t + R\_n\$의 관계에 의하면 \$R\_c\$는 tunneling 저항 \$R\_t\$에만 의존하게 된다.

여기에서 \$R\_t\$는 ohmic 접촉저항을 결정하는 데 중요한 요소임을 암시한다. 특히 열처리 시간 및 온도에 따라 \$N\_D^+\$층의 농도는 변화하므로 \$R\_t\$의 값은 바뀌게 되며 따라서 \$R\_c\$의 값도 변한다.

일정한 두께를 가진 채널층에서 열처리 조건에 따른 \$N\_D^+\$층의 Ge 도핑농도의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 일차원적으로 원자가 고체내를 확산할 때, 확산계수가 확산농도에 의존하지 않고 Ge의 확산과정이 Fick의 제 2 법칙을 따른다는 가정을 만족할 때, \$D\_{Ge} = 3 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{sec}\$와 \$N\_D^+\$층의 두께가 \$900 \text{\AA}\$일때, 열처리 시간에 따른 \$N\_D^+\$층에서의 평균 Ge의 농도를 고려하여, ohmic 접촉저항을 계산하면 그림 9와 같이 나타난다.<sup>(12)</sup> 평균 Ge의 농도는 시간에 따라 증

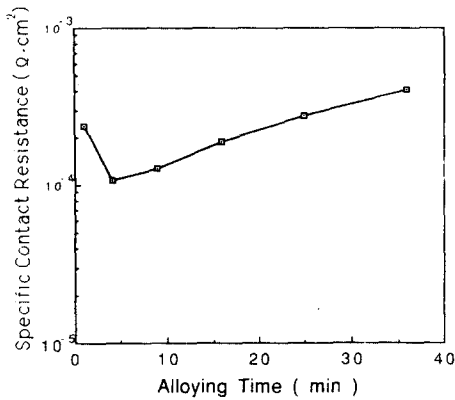


그림 9.  $N_D^+$ 층에서 시간에 따른 Ge 평균 농도의 변화  
Fig. 9. Change of average Ge concentration as a function of alloying time in  $N_D^+$  layer.

가하다가 최대치를 이룬 후 감소하기 때문에 결국 ohmic 접촉저항은 시간에 따라 감소하다가 최소치를 이룬 후 다시 서서히 증가하게 된다.

열처리 온도나 열처리 시간에 따라서 ohmic 접촉저항이 감소하다가 최소치를 보인 후 다시 증가하는 현상이 HEMT 및 MESFET 구조에서 각각 관찰되었으며(그림 2, 3), 이 현상은 본 연구에서 제시한 확산 모델을 통하여 해석될 수 있었다. 그러나 MESFET 구조에서는 ohmic 접촉초기에 NiAs(Ge) 양이 증가함에 따라 ohmic 접촉저항은 급격히 감소하였고, 이후 서서히 증가하는 현상을 보였다(그림 7). 한편, HEMT 구조의 경우 NiAs(Ge) 양은 열처리 시간 및 온도에 의존하지 않았으며, 아울러 ohmic 접촉저항도 NiAs(Ge)의 부피분율에 무관하게 변화하였다(그림 2, 6). 따라서 HEMT 구조에서의 ohmic 접촉저항 변화는 이차원 전자가스층(2DEG)까지의 Ge 확산에 의한 운반자 농도의 변화로 설명할 수 있으며, 이것은 본 연구에서 제시한 확산 모델을 통하여 정성적으로 해석된 결과와 그 경향이 일치하였다(그림 9). 한편 MESFET 구조의 시편의 경우, ohmic 접촉초기에는 NiAs(Ge)의 형성이 ohmic 접촉저항의 감소에 크게 기여를 하며(그림 7), 이후 ohmic 접촉저항이 서서히 증가되는 현상은 NiAs(Ge)/GaAs 계면에 Ge의 확산에 의해 형성된  $N_D^+$ 층에서의 운반자 농도가 높은 열처리 온도 및 긴 열처리 시간에서 감소하기 때문으로 설명될 수 있다. 한편 MESFET 구조에서는 HEMT 구조에서와 달리 화학적 결합력이 강한 AlGaAs 층이 위치하고 있지 않기 때문에, Ge의 확산이 HEMT 구조에서보다 용이하며, 따라서 최소 접촉저

항을 나타내는 열처리 온도는 낮아지고(그림 2), 열처리 시간도 짧아지게 된다(그림 3). 따라서 ohmic 접촉저항이 최소치를 보인 후, 다시 증가하는 현상은 Ge의 확산깊이가 깊어짐에 따라  $N_D^+$ 층에서의 운반자 농도의 감소때문인 것으로 해석될 수 있었다.

이상과 같이 HEMT 구조 및 MESFET 구조에서의 ohmic 접촉저항 형성기구에 대해서 살펴보았다. 본 연구에서는 주로 NiAs(Ge)의 형성과 운반자 활성화 원소인 Ge의 확산현상을 고려하여 ohmic 접촉저항의 열처리조건에 따른 변화를 설명하였다. 그러나 ohmic 열처리시 Ga 및 As이 ohmic 접촉 금속층으로 확산하는 outdiffusion 현상이 일어나며(그림 5(c)), 이때 Ga vacancy 및 As vacancy가 ohmic 접촉물질/GaAs 계면에 형성되어 운반자 농도에 영향을 미칠 수도 있다. 이와같은 현상이 ohmic 접촉현상에 미치는 영향에 대해서는 앞으로 많은 연구가 필요하리라 생각된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 MESFET 구조와 HEMT 구조위에 AuGe(1500Å)/Ni(500Å)Au(2000Å)의 ohmic 재료를 차례로 열증착시킨 후, 열처리 조건에 따른 ohmic 접촉경향을 상변태 현상 및 각 상의 결정분석에 근거하여 비교 분석하였다.

MESFET 구조에서 ohmic 접촉형성을 용이하게 만드는 화합물인 NiAs(Ge)은 열처리의 초기에 형성되어 ohmic 접촉저항을 낮추는 역할을 하며, 이후  $N_D^+$ 층에서의 Ge 농도가 변화가 ohmic contact 저항증가를 초래한다.

HEMT 구조에서 ohmic 접촉저항은 NiAs(Ge)의 부피분율과 무관하게 변화하였으며, 이것은 ohmic 접촉저항이 주로 2-DEG 층까지의 Ge 농도 변화에 의존한다는 것을 암시한다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A. Christou, T. Efthimiopoulos and Z. Hatsopoulos, *Appl. Phys. Lett.*, 49, 1077, 1986.
- [2] M. Murakami, K.D. Childs, J.M. Baker and A. Callegari, *J. Vac. Sci. Tech.* B4, 903, 1986.
- [3] Y.C. Shih, M. Murakami, E.L. Wilkie and A. Callegari, *J. Appl. Phys.*, 62, 582, 1987.
- [4] T.S. Kuan, P.E. Batson, T.N. Jackson, H. Rupprecht and E.L. Wilkie, *J. Appl. Phys.* 54, 6952, 1983.



- [5] W-P. Hong, K.S. Seo, P. Kbhattacharya and H. Lee, *IEEE DEL-7*, 320, 1986.
- [6] P. Zwichnagl, S.D. Mukherjee, P.M. Capani, H. Lee, H.T. Friem, L. Rathbun, J.D. Berry, W.L. Jones and L.F. Eastman, *J. Vac. Sci Technol.*, B4 476, 1986.
- [7] H. Goronkin, S. Tehrani, T. Rimmel, P.L. Fejes and K.J. Johnson, *IEEE ED-36*, 281, 1989.
- [8] W.L. Jones and L.F. Eastman, *IEEE ED-33*, 712, 1986.
- [9] T. Kim and D.D. Lchung, *J. Vac. Sci. Technol* B4, 762, 1986.
- [10] A.K. Rai, A. Ezis, A.W. McCormick, A.K. Petford-Long and D.W. Langer, *J. Appl. Phys.* 61, 4682, 1987.
- [11] A.Y.C. Yu, *Solid-state Electron*, 13, 239, 1970.
- [12] J.L. Lee, to be Published.

---

 著 者 紹 介
 

---

李 鍾 覽 (正會員) 第25卷 第11號 參照  
 현재 한국전자통신연구소 신  
 소자재료연구실 선임연구원

●

李 載 珍 (正會員) 第23卷 第 3 號 參照  
 현재 한국전자통신연구소 신  
 소자재료연구실 선임연구원

●

朴 盛 鎬 (正會員) 第25卷 第11號 參照  
 현재 한국전자통신연구소 신  
 소자재료연구실 선임연구원

金 鎮 婁 (正會員) 第26卷 第10號 參照  
 현재 한국전자통신연구소 신  
 소자재료 연구실장

●

馬 東 星 (正會員) 第25卷 第11號 參照  
 현재 한국전자통신연구소 화  
 합물반도체연구부 연구위원