

# 이온주입공정에 의한 고 gm GaAs MESFET의 설계

## (A Design of Ion-Implanted GaAs MESFET's Having High Transconductance Characteristics)

李昌錫\*, 沈揆煥, 朴亨茂\*, 朴晨鐘\*

(Chang Seok Lee, Gyu-Hwan Shim, Hyung Moo Park and Sin-Chong Park)

### 要 約

포화속도 모델을 이용하여 이온주입공정에 의한 GaAs MESFET를 설계하였다. 20KeV의 Si<sup>-</sup> 이온 주입공정과 975°C, 5sec의 RTP 활성화공정에 의해 V<sub>th</sub>가 -0.5V 일때의 gm이 460ms/mm인 MESFET를 설계할 수 있었다.

### Abstract

The current-voltage characteristics of ion-implanted GaAs MESFET's have been simulated by using the velocity saturation model. Using this model, a MESFET with threshold voltage of -0.5V and transconductance of 460 mS/mm is designed. To implement high transconductance MESFET's, low energy ion-implantation (20 keV) and RTP(Rapid Thermal Process) activation (575°C, 5sec) processes are required.

### I. 서 론

GaAs는 물질자체의 특성면에서 Si보다 전자의 이동도가 2~5배 크며, 반절연기판을 만들 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 초고속 저소비전력 GaAs 디지털 IC를 제작하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. GaAs 디지털 IC의 성능은 기본소자인 MESFET의 특성에 좌우되므로 초고속 IC를 만들기 위해서는 MESFET의 트랜스컨덕턴스를 최대로 하는 것이 중요하다. GaAs MESFET의 제작방법으로는 에피 웨이퍼를 사용한 메사형태와 이온주입법에 의한 planar형태가 있으나 디지털 IC는 소자특성의 균일성이 좋고 소자 분리가 불필요하며 제조경비가 적게드는 이온주입법에 의한 제작방법이 지배적이다.

본 논문에서는 포화속도 모델을 이용하여 이온주입

에너지 및 주입이온량이 MESFET의 특성에 미치는 영향을 계산하였고, 주어진 V<sub>th</sub>조건에서 고 gm GaAs MESFET를 설계하였다. 한편 활성화공정에 의한 불순물의 재분포가 MESFET에 미치는 영향을 조사하였고, RTP(Rapid Thermal process)<sup>1)~3)</sup>에 의한 활성화법의 유용성을 제안하였다.

### II. 이온주입 GaAs MESFET의 설계

그림 1에 GaAs MESFET의 단면을 나타내었다. 앞으로의 계산은 이 구조를 이용하며, 다음과 같은 가정을 하였다.

- i) 게이트금속은 Al이다.
- ii) n<sup>+</sup>의 불순물농도는 10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>이다.
- iii) 소오스 및 드레인 영역에서 n<sup>+</sup>의 깊이는 0.5μm이다.
- iv) 소오스 및 드레인 전극의 접촉저항은 10<sup>-6</sup>ohm·cm<sup>2</sup>이다.
- v) 채널부분의 불순물농도 N<sub>a</sub>는 길이 방향으로 a가

\*正會員, 韓國電子通信研究所  
(Electronics and Telecoms. Research Institute)  
接受日字: 1986年 8月 30日

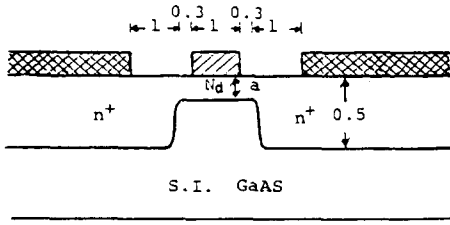


그림 1. 모델링에 사용된 MESFET의 구조(단위: μm)  
Fig. 1. A MESFET structure used in modeling.  
(unit: μm)

지 일정하며 a이상의 깊이에서는 이동 가능한 전자가 없다.

1. 포화속도모델에 의한 MESFET의 전류전압특성  
GaAs 내에서 이동하는 전자에 대하여 전계와 이동속도와의 관계를 그림 2에 나타냈다. 불순물농도가 약  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ 일 때의 특성을 실선으로 나타내었으며 포화속도 모델에서 전류의 계산에 사용한 특성을 점선으로 나타내었다.  $E_s$ (포화속도전계) 보다 낮은 전계에서의 이동도  $\mu$ 는 불순물 농도에 따라 달라지며 실험치<sup>11)</sup>로부터 다음과 같은 근사식을 만들어 사용하였다.

$$\mu = 10^{13.95 - 10 \log N_d - 14.77} \quad (1)$$

for  $10^{16} \leq N_d \leq 10^{18}$

게이트의 길이가  $1 \mu\text{m}$ 일 때 포하이동속도  $V_s$ 는  $1.35 \times 10^{17} \text{cm/sec}$ 를 사용하였다.<sup>12)</sup>

MESFET에서의 전류  $I_b$ 를 구하기 위하여 게이트 아래의 채널을 그림 3과 같이 직선영역  $L_1$ 과 포화영역  $L_2$ 로 나누어 생각한다.  $L_1$ 영역에서의 전계는 포화속도전계  $E_s$ 보다 작아서  $L_1$ 에서의 전자이동속도는 전계에 비례하며 이 영역에서의 전류  $I_{b1}$ 는 shockley 모델을 적용하여 계산할 수 있다.<sup>12,3)</sup>

$$I_{b1} = \frac{1}{L_1} q N_d Z \mu a \left[ V - \frac{2}{3} (V_{bi} + V - V_{GS})^{3/2} / V_p^{1/2} \right] \Big|_{V=0}^{V=V_{L1}} \quad (2)$$

$N_d$ : 전도층의 불순물 농도

$Z$ : 게이트 전극의 폭

$\mu$ : 전자의 이동도

$a$ : 전도층 두께

$V_{bi}$ : built-in 전압

$V_p$ : pinch-off 전압

$L_2$ 영역에서의 전계는 포화속도전계  $E_s$ 보다 크므로 전자의 이동속도는 포화속도  $V_s$ 로 일정하다. 따라서 이 영역에서의 전류  $I_{b2}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>3)</sup>

$$I_{b2} = q N_d Z b_s V_s \quad (3)$$

$$b_s = a \left[ 1 - \left( (V_{bi} - V_{GS} + V_{DS} - V_{L2}) / V_p \right)^{2/3} \right] \quad (4)$$

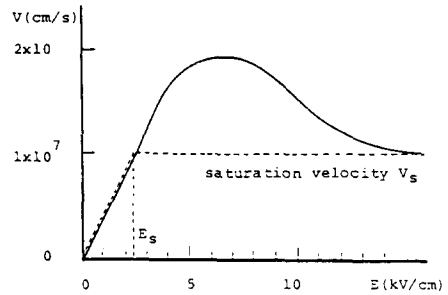


그림 2. GaAs에서의 전자이동속도와 전계와의 관계 ( $N_d \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ )  
Fig. 2. Electron drift velocity vs. electric field in GaAs ( $N_d \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ).

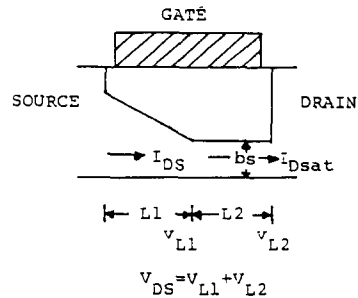


그림 3. GaAs MESFET 모델의 개요.  
Fig. 3. Schematic diagram of the GaAs MESFET model.

여기서  $b_s$ 는 두 영역의 경계에서의 채널폭이다. 직선영역  $L_1$ 에서의 전류  $I_{b1}$ 와 포화영역  $L_2$ 에서의 전류  $I_{b2}$ 는 같아야 하며  $L_1$ 의 크기를 조절하면 같아진다.  $V_{L1}$ 과  $V_{L2}$ 는 각각  $L_1$ 영역과  $L_2$ 영역에서의 전압강하를 나타내며  $V_{L2}$ 는 이차원 시뮬레이션 결과를 이용하여 다음과 같이 표시할 수 있다.<sup>3,4)</sup>

$$V_{L2} = \frac{2a}{\pi} E_s \sinh\left(\frac{\pi L_2}{2a}\right) \quad (5)$$

$$L = L_1 + L_2 \quad (6)$$

$$V_{DS} = V_{L1} + V_{L2} \quad (7)$$

소오스저항,  $R_s$  및 드레인저항,  $R_D$ 는 금속과 GaAs 사이의 접촉저항  $R_{CS}$ ,  $R_{CD}$ 와 소오스 및 드레인에서 게이트까지의 직렬저항  $R_{SS}$ ,  $R_{SD}$ 로 나누어 생각할 수 있으며  $R_{CS}$ 와  $R_{SS}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>2)</sup>

$$R_{CS} = \frac{1}{Z} (\rho_c / q \mu N_d a_1)^{1/2} \quad (8)$$

$$R_{SS} = \left( \frac{L_{SC}}{a} \right) (q \mu N_d Z)^{-1} + \left( \frac{L_{SD}}{a_1} \right) (q \mu' n' Z)^{-1} \quad (9)$$

$\rho_c$ : 접촉 저항률

$L_{SC}$ : n'에서 게이트까지의 거리

$a_1$  :  $n^-$ 의 두께

$L_{SG1}$  :  $n^-$ 의 게이트쪽 끝에서 게이트전극까지의 거리

$\mu'$  :  $n^-$ 에서의 전자 이동도

$R_S$ 와  $R_D$ 의 영향으로 모델에서의  $V_{DS}$ 와  $V_{GS}$ 는 단자전압  $V_D$ 와  $V_G$ 보다 낮은 값이 된다.

$$V_{DS} = V_D - I_D(R_S + R_D) \quad (10)$$

$$V_{GS} = V_G - I_D R_S \quad (11)$$

위의 식들을 이용하여 MESFET에서의 전류  $I_D$ 를 구하는 부프로그램의 흐름도는 그림 4와 같다. 게이트전압을 임계전압보다 더 낮게 하면 드레인전압에 관계없이 드레인전류가 흐르지 않게 되는데, 이때의 임계전압,  $V_{th}$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$V_{th} = V_{bi} - V_p \quad (12)$$

GaAs 디지털IC에 쓰일 MESFET의  $V_{th}$ 는 소비전력과 전달속도를 고려하여 결정되며 초고속LSI의 경우  $-0.5V$  근방의 값이 많이 쓰인다.<sup>5,6</sup> 본 논문에서 설계된 MESFET의  $V_{th}$ 는  $-0.5V$ 를 기준으로 한다.

그림 1과 동일한 구조의 MESFET에서  $N_D$ 와  $V_{th}$ 가 각각  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $-0.5V$ 일 때 계산한 전류-전압특성을 그림 5에 나타내었다.

이때  $R_S$ 는  $0.45 \text{ohm} \cdot \text{mm}$ 이며,  $V_G$ 와  $V_D$ 가 각각  $0.6V$ ,  $3V$ 일 때  $g_m$ 은 약  $220 \text{ms/mm}$ 이다.

2. 이온주입공정에 의한 고 gm MESFET의 설계

GaAs MESFET에서 전도층을 형성하기 위하여 Si<sup>+</sup> 이온을 주입하면 깊이방향으로 다음과 같은 불순물분포  $N(x)$ 를 가진다.<sup>7</sup>

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (13)$$

여기서  $Q$ 는 dose량이고  $R_p$ 와  $\sigma$ 의 값들은 표 1과 같이

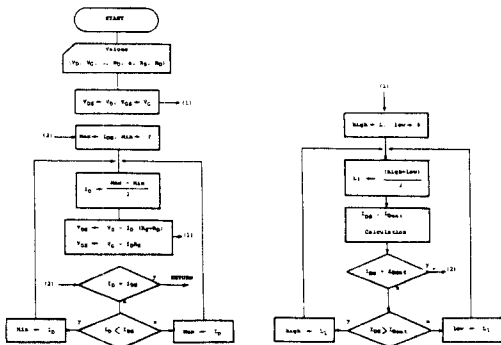


그림 4. 전압-전류특성을 구하는데 사용된 부프로그램의 흐름도

Fig. 4. Flow chart of the subroutine used in calculating current-voltage characteristics.

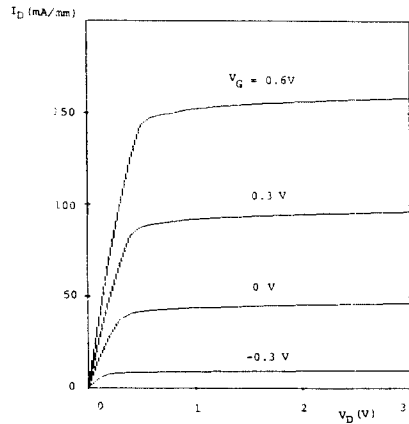


그림 5. 계산에 의한  $I_D$ - $V_D$ 곡선 ( $N_D=2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $V_{th} = -0.5V$ )

Fig. 5. Calculated current-voltage characteristics of the MESFET ( $N_D=2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $V_{th} = -0.5V$ ).

표 1. GaAs기판에 주입된 Si이온의 분포특성  
Table 1. Distribution properties of implanted Si ions in GaAs substrate.

Ion energy (KeV)	$R_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )
10	0.0103	0.0074
20	0.0183	0.0125
30	0.0262	0.0170
40	0.0343	0.0213
50	0.0424	0.0254

알려져 있으며, 임계전압  $V_{th}$ 는 다음과 같다.<sup>8</sup>

$$V_{th} = \phi_n - \phi_n - \frac{qR_pQ}{2\epsilon_s} \text{erf}\left(\frac{R_p}{\sqrt{2}}\right) - \frac{qQ\sigma}{\epsilon_s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{R_p^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

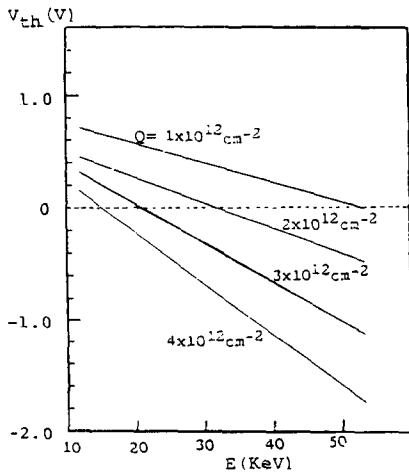
$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c(R_p + 2\sigma)}{Q}\right) \quad (15)$$

표 1과 식(14), 식(15)를 이용하여 이온주입조건에 따른  $V_{th}$ 의 변화를 그림 6과 같이 구할 수 있다.  $V_{th}$ 가 일정한 경우 dose량이 쿨수록 주입에너지 변화에 의한  $V_{th}$ 의 변화율이 커짐을 알 수 있고 주입에너지가 높을수록 dose량 변화에 대한  $V_{th}$ 의 변화가 커짐을 알 수 있다.

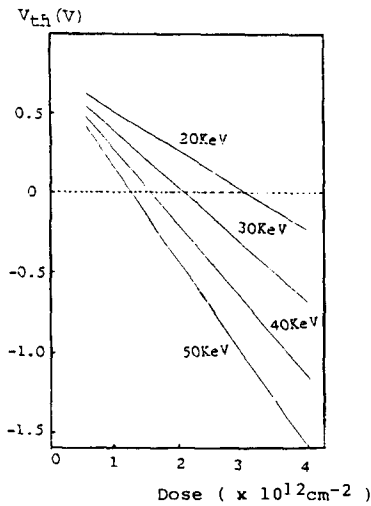
$g_m$ 은 드레인전압을  $3V$ 로 고정시켜 놓고  $V_G$ 가  $0.5V$ 일 때와  $0.6V$ 일 때의 전류를 구하여 계산하였다.

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} \right|_{V_{DS} = 3.0V} \quad (16)$$

실제의 불순물분포는 식(13)과 같이 표시되지만 이온



(a)



(b)

그림 6. 이온주입조건에 따라 예상되는 임계전압의 변화

- (a) 이온에너지에 따른 변화
- (b) Dose 량에 따른 변화

Fig. 6. Expected variations of threshold voltage ( $V_{th}$ ) with implant condition (Si into GaAs).  
 (a) Variation with implant energy.  
 (b) Variation with dose.

주입에 의한 불순물분포의 영향을 고려하면서 계산을 간략히 하기 위해 실제의 불순물분포를 다음과 같이 계단형 불순물분포로 변환하였다. 즉 변환된 불순물분포에서의 총 불순물량 및 임계전압이 실제 불순물분포에서의 값들과 같아지는  $N_d$ 와  $a$ 를 구하여 전류를 계산하였다.

$$Q = N_d \cdot a \tag{17}$$

$$N_d a^2 = QR_p \operatorname{erf}\left(\frac{R_p}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} Q \sigma \exp\left(-\frac{R_p^2}{2\sigma^2}\right) \tag{18}$$

실제의 불순물분포와 식(17), 식(18)에 의해 구한 계단형 불순물분포는 그림 7과 같으며, 그림 8은  $V_{th}$ 를 -0.5V로 일정하게 할 때 주입에너지에 따른  $g_m$ 의 변화를 나타내었다. 낮은 에너지로 이온주입할 수록  $g_m$ 은 커지며 20KeV의 이온주입에 의해  $g_m$ 이 460ms/mm인 MESFET를 제작할 수 있다. 현재 에피 웨이퍼를 이용한 GaAs MESFET의  $g_m$ 이 170~260ms/mm임을 생각할 때<sup>9)</sup> 낮은 에너지 이온주입에 의해  $g_m$ 특성을 개선할 수 있음을 알 수 있다. 이온의 주입에너지 감소에 의한 불순물 주입깊이의 감소에도 불구하고  $V_{th}$ 를 일정하게 하기 위해서는 dose량을 증가시켜야 하고 dose량의 증가에 따라 이동가능한 전자의 양이 증가하여 그림 8과 같이 이온의 주입에너지가 낮을수록  $g_m$ 이 증가한다.

### 3. 활성화에 의한 불순물 재분포가 MESFET 특성에 미치는 영향

이온주입방법으로 전도층을 형성하는 경우 고온처리에 의해 주입된 이온들을 활성화(activation)하여야 한다. 활성화를 행한 후의 불순물분포  $N(x, t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>7),10),11)</sup>

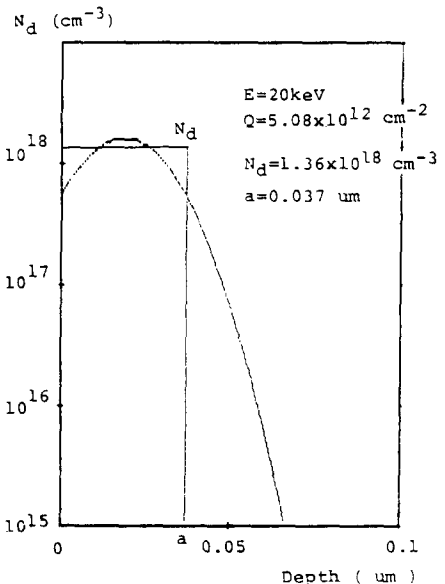


그림 7. 이온주입후의 불순물분포 및 계단형으로 변환된 불순물분포

Fig. 7. Profiles of impurity implanted and transferred to step-function.

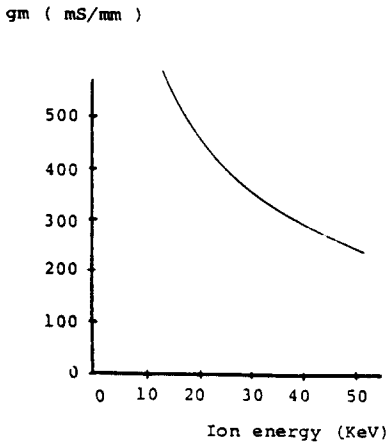


그림 8. 임계전압이 -0.5V인 MESFET에서 이온에너지의 변화에 따른 트랜스컨덕턴스 gm의 변화  
 Fig. 8. Expected transconductance gm with implant energy for the MESFET of Vth of -0.5V.

$$N(x, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2}(\sigma^2 + 2Dt)^{1/2}} \left[ \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{\sigma}{R_p} \frac{(x-R_p)^2}{\sigma^2 + 2Dt}\right\} + \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{\sigma}{R_p} \frac{(x+R_p)^2}{\sigma^2 + 2Dt}\right\} \right] \quad (19)$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{2kT}\right) \quad (20)$$

여기서,  $E_a = 2.5\text{eV}$   
 $D_0 = 8.08 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{sec}$   
 (0.2 $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> cap인 경우)

고 gm MESFET를 만들기 위해 이온에너지는 20KeV, dose는  $5.08 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 인 조건으로 이온주입하고 850°C에서 30분간 활성화하면 그림 9와 같이 채널의 깊이가 0.04 $\mu\text{m}$ 에서 0.07 $\mu\text{m}$ 로 75%나 증가한다. 이와 같이 활성화과정에 의한 불순물의 재분포는 낮은 에너지에 의한 이온주입일수록 전도층두께가 얇으므로 그 영향이 커진다.

이러한 불순물재분포를 억제하여 Vth의 변화를 적게 하고 고 gm 특성을 유지하기 위해 RTP(Rapid Thermal Process)방법이 사용 되어야 한다. 975°C에서 5초간 RTP 방법으로 활성화 했을 때의 불순물 분포를 계산하면 그림10과 같이 전도층의 두께가 많이 변하지 않음을 알 수 있다. 이온주입공정후의 Vth가 -0.5V인 경우 활성화공정후의 Vth와 gm의 변화는 그림11과 같다. 주입에너지가 20KeV인 경우 노(furnace)를 이용하여 850°C에서 30분 활성화 했을 때 Vth가 -0.5V에서 -1.73V로 1.23V나 변화하였고, gm은 460mS/mm

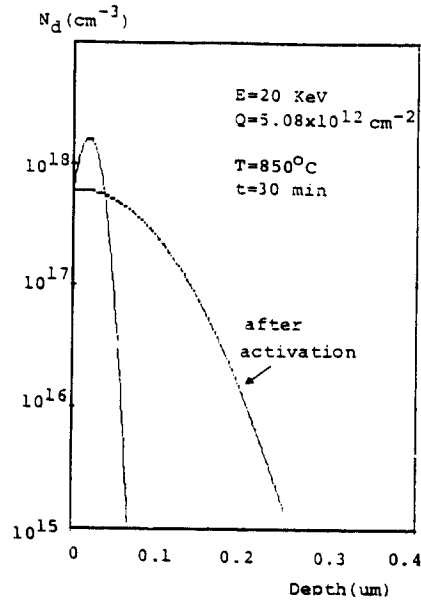


그림 9. 이온주입후와 활성화후에 예상되는 불순물 분포  
 Fig. 9. Expected profiles of impurity just implanted and after furnace activation.

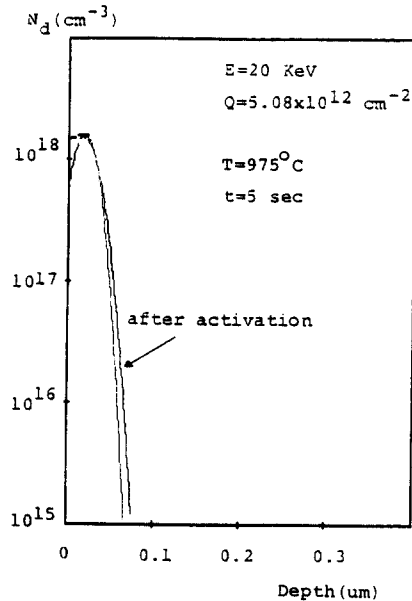
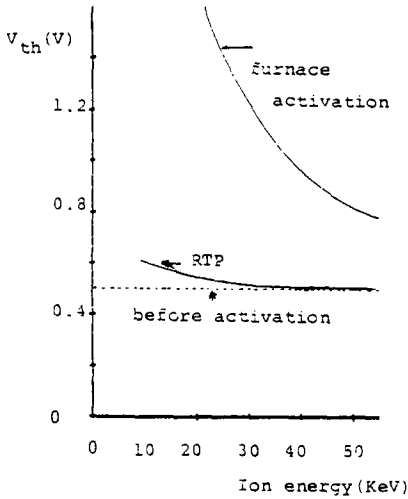
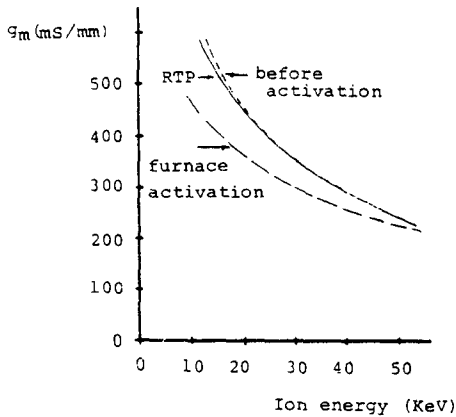


그림 10. 이온주입후와 RTP활성화후에 예상되는 불순물 분포  
 Fig. 10. Expected profiles of impurity just implanted and after RTP activation.

에서 360mS/mm로 감소하였다. 한편 RTP에 의한 활성화 공정후에는 Vth가 -0.54V로 거의 변화하지 않았



(a)



(b)

그림 11. 활성화 후에 예상되는 MESFET의 특성변화  
(a) 임계전압의 변화  
(b) 트랜스컨덕턴스의 변화

Fig. 11. Expected variations of MESFET characteristics with activation processes.  
(a) Variations of threshold voltage.  
(b) Variations of transconductance.

고  $g_m$ 의 감소도 1% 이내로 작음을 알 수 있다.

### III. 결 론

GaAs 초고속 디지털IC를 제작하기 위해서는 이온주입공정에 의한 GaAs MESFET의 제작이 필요하다. 포화속도 모델에 의한 해석결과 20KeV의 실리콘 이온주입 공정에 의해  $V_{th}$ 가  $-0.5V$ 일 때  $g_m$ 이  $460ms/mm$ 인 MESFET을 설계할 수 있었다. 이온주입후의  $V_{th}$ 를  $-0.5V$ 로 하였을 경우 노(furnace)에 의한 활성화 후의  $V_{th}$ 는  $-1.73V$ 이고  $g_m$ 은 22%정도 감소하는 것으로 나

타났으나 RTP활성화후의  $V_{th}$ 는  $-0.54V$ 이고  $g_m$ 은 1%정도 감소함을 알 수 있었다. 따라서  $g_m$ 이 큰 ME-SFET를 만들기 위해서는 낮은 에너지 이온주입과 RTP 활성화공정이 필수적이다.

### 參 考 文 獻

- [1] N.G. Einspruch, and W.R. Wisseman, *VLSI Electronics Microstructure Science*, vol. 11, Academic Press Inc. 1985.
- [2] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [3] R.Soares, et al., *Applications of GaAs MESFETs*, Artech House Inc., 1983.
- [4] G.W. Taylor, et al., "A device model for an ion-implanted MESFET," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, pp. 172-182, March 1979.
- [5] M.Hirayama, et al., "A GaAs 4kb SRAM with direct coupled FET logic," *1984 IEEE ISSCC*, pp. 46-47, 1984.
- [6] Y.Ishii, et al., "Processing technologies for GaAs memory LSIs," *1984 IEEE GaAs Symposium*, pp. 121-124, 1984.
- [7] S.K. Ghandhi, *VLSI Fabrication Principles*, John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [8] J.A. Higgins, "Modeling the influence of carrier profiles on MESFET characteristics," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-27, pp. 1066-1073, June 1980.
- [9] K.Maemura, et al., "A 1GHz-5mA/5V dual modulus GaAs prescaler IC," *IEDM 85*, pp. 94-97, December 1985.
- [10] H.Kanber, et al., "A comparison of rapid thermal annealing and controlled atmosphere annealing of Si-implanted GaAs," *J. Appl. Phys.*, vol. 57, pp. 4732-4737, May 1985.
- [11] M.E. Greiner, et al., "Diffusion and electrical properties of silicon doped gallium arsenide", *J. Appl. Phys.*, vol. 57, pp. 5181-5187, June 1985.

### 감 사

많은 조언을 해주신 허성익씨와 장원익씨께 진심으로 감사드립니다.

한국전자통신연구소의 단위공정개발실, 공정장비 개발실 실원들께도 감사드립니다.