

## 온도변화에 따른 GaAs MESFET의 주파수 특성에 관한 연구

### A Study on Frequency Response of GaAs MESFET with different Temperatures

정태오, 박지홍, 안형근, 한득영  
(Teo Jung, Chi-Hong Park, Hyungkeun Ahn, Deuk-Young Han)

#### Abstract

In this study, unity current gain frequency  $f_T$  of GaAs MESFET is predicted with different temperatures up to 400 °C. Temperature dependence parameters of the device including intrinsic carrier concentration  $n_i$ , effective mass, depletion width are considered to be temperature dependent. Small signal parameters such as gate-source, gate drain capacitances  $C_{gs}$   $C_{gd}$  are correlated with transconductance  $g_m$  to predict the unity current gain frequency. The extrinsic capacitance which plays an important roles in high frequency region has been taken into consideration in evaluating total capacitance by using elliptic integral through the substrate. From the results,  $f_T$  decreases as the temperature increases due to the increase of small signal capacitances and the mobility degradation. Finally the extrinsic elements of capacitances have been proved to be critical in deciding  $f_T$  which are originated from the design rule of the device.

**Key Words** : MESFET, cut-off frequency, capacitance, transconductance, extrinsic

#### 1. 서론

GaAs MESFET은 Si를 이용한 소자보다 까다로운 공정과 높은 가격으로 인하여 아직까지 그 이용범위가 일반적이지는 못하다. 그러나 현재 정보통신의 발달로 GaAs MESFET은 이동통신이나 RF 회로에 LNA 또는 power 부품소자로 사용되고 있으며, 그 이용범위가 점점 확대되고 있다. 초고주파와 초고속의 디지털 회로에서 중요한 부분으로 자리잡고 있어, 보다 정확한 모델을 개발하고자 많은 연구가 진행되고 있으나 지금까지 제안된 모델은 온도에 대한 해석이 부족하고, 온도에 대한 특성을 제시한 경우도 그 온도의 한계가 낮았다. 초고주파 집적회로의 설계에 있어서, 주파수 특성에 대한 정확한 예측이 필요하므로 신뢰성의 향상 측면에서 온도변화에

대한 영향을 고려해야 한다. 본 논문에서는 온도변화에 따른 GaAs MESFET의 주파수 특성에 대한 해석적 모델을 제시하였다. 소신호 등가회로에서, 온도변화에 따른 intrinsic 정전용량의 변화와 트랜스컨덕턴스의 변화를 통해 차단주파수의 변화를 예측하였으며, 실제 소자에서 주파수 특성에 영향을 미치는 소자 구조에 따른 extrinsic 정전용량과 저항을 고려하여 실제 회로설계에 적용할 수 있는 최적의 디자인 rule을 제시하였다.[1][2]

#### 2. 온도변화에 따른 정전용량 모델

##### 2.1 온도에 따른 변수

온도에 따른 정전용량을 계산하기 위해 유효질량, 진성캐리어 농도, 내부전압( $V_{bi}$ )과 공핍층의 두께( $a$ )가 온도에 따라 변하는 성질을 이용하였다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.[6][9][10]

건국대학교 전기공학과  
(서울특별시 광진구 화양동 1번지 건국대학교,  
Fax: 02-447-9186  
E-mail : hkahn@kkucc.konkuk.ac.kr)

$$n_i = 4 \times 10^{15} \times \left( \frac{m_n^*}{m_0} \cdot \frac{m_p^*}{m_0} \right)^{3/4} \times \left( \frac{T}{300} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (1)$$

$$m_e^{\Gamma}(T) = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{3} \left( \frac{2}{E_0(T)} + \frac{1}{E_0(T) + \Delta_0(T)} \right)} \quad (2)$$

$$m_e^{\Gamma}(T) = m_e^{\Gamma}(T=0) \frac{E_0(T)}{E_0(T=0)} \quad (3)$$

$$m_{HH}^s(T) = m_{HH}^s(T=0) \frac{E_0(T)}{E_0(T=0)} \quad (4)$$

$$m_{LH}^s(T) = m_{LH}^s(T=0) \frac{E_0(T)}{E_0(T=0)} \quad (5)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) - \frac{(E_C - E_F)}{q} \quad (6)$$

$$a(x) = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V(x) - \frac{kT}{q})}{qN_D}} \quad (7)$$

$m_e^{\Gamma}(T)$  : GaAs의 온도변화에 따른 전자의  $\Gamma$  밸리에서의 유효질량

$m_{HH}^s, m_{LH}^s$  : heavy hole과 light hole의 유효질량  
GaAs의 경우 각각 0.5, 0.08

## 2.2 공핍층의 변화에 따른 정전용량의 계산

본 논문에서는 GaAs MESFET의 주파수 특성을 관찰하는 것이 목적이므로, 포화영역만을 고려하여 다음의 그림과 같이 공핍층의 내부를 5개의 영역으로 나누어 각 영역의 전하를 구하고, 전압에 대한 변화율을 구함으로써 정전용량을 구하게 된다.[2][8]

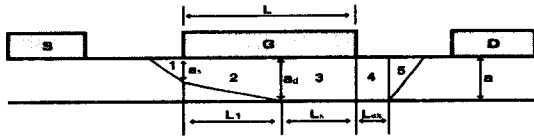


그림 1. 포화영역에서 MESFET의 내부 공간전하 분포.

$$C_{gsi} = \epsilon W + \frac{1}{4} \frac{\sqrt{2}\epsilon W \cdot \left[ L - L \left( 1 - \frac{V_p + V_g - V_s - V_{bi}}{V_d - V_s} \right) \right]}{\left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_s - kT)}{qN_D} \right)^{1/2}} \quad (8)$$

$$+ qN_D W L \cdot \left[ \frac{1}{2} \sqrt{2} \left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_s - kT)}{qN_D} \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \sqrt{2} \left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_d - kT)}{qN_D} \right)^{1/2} \right]$$

$$\left[ \frac{1}{V_d - V_s} - \frac{V_p + V_g - V_s - V_{bi}}{(V_d - V_s)^2} \right]$$

$$+ qN_D W a L \left[ \frac{1}{V_d - V_s} - \frac{V_p + V_g - V_s - V_{bi}}{(V_d - V_s)^2} \right]$$

$$C_{gsd} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}\epsilon W \cdot \left[ L - L \left( 1 - \frac{V_p + V_g - V_s - V_{bi}}{V_d - V_s} \right) \right]}{\left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_d - kT)}{qN_D} \right)^{1/2}} \quad (9)$$

$$- qN_D W \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_s - kT)}{qN_D} \right)^{1/2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_d - kT)}{qN_D} \right)^{1/2} \right] \frac{1}{(V_d - V_s)^2}$$

$$+ \frac{qN_D W a L (V_p + V_g - V_s - V_{bi})}{(V_d - V_s)^2}$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \frac{W a \epsilon}{\left( \frac{2\epsilon(V_{bi} - V_g + V_d - kT)}{qN_D} - a^2 \right)^{1/2}}$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot qN_D W a \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\epsilon}{\left( \frac{\epsilon(V_{bi} - V_g + V_d - kT)}{qN_D} \right)^{1/2}} \frac{1}{qN_D} - \frac{\epsilon}{\left( \frac{2\epsilon(V_{bi} - V_g + V_d - kT)}{qN_D} - a^2 \right)^{1/2}} \right]$$

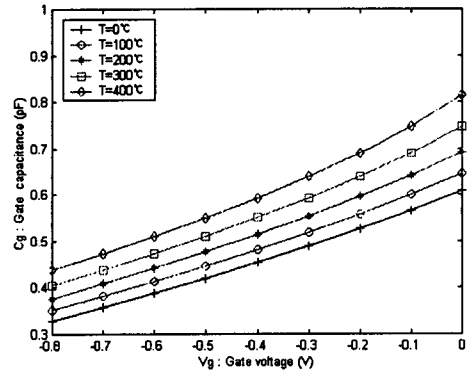


그림 2. 온도변화에 따른 Cg의 변화 ( $V_D = 2V$ ).

## 3. 온도변화에 따른 트랜스컨덕턴스

GaAs MESFET에서는 온도에 따라서 문턱전압이 변하고 이에 따라 드레인 전류도 변화한다. 이러한 전류-전압특성의 변화에 따라 트랜스컨덕턴스도 온도에 따라 변화하는데, 일반적인 트랜스컨덕턴스  $g_m$ 의 표현은 포화영역 내에서 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.[5]

$$g_{mi} = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} = G_0 \frac{(V_{DS} + V_{bi} - V_{GS})^{1/2} - (V_{bi} - V_{GS})^{1/2}}{V_P^{1/2}} \quad (10)$$

여기서,  $G_0$ 는 최대 채널 개방시의 이득으로 다음과 같이 표현된다.

$$G_0 = \frac{qN_D \mu_n W a}{L} \quad (11)$$

트랜스컨덕턴스  $g_m$ 에서의 온도에 대한 변수는 정전 용량에서 고려한 변수들과 동일하며, 전자의 이동도  $\mu_n$ 을 온도에 대한 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu_n = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-n} \quad (12)$$

GaAs의 경우 실온에서의 이동도  $\mu_0$ 는 2000~4000 [ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ]의 값을 가지며 실온에서  $n$ 은  $0.5 \pm 0.1$ 의 값을 갖는다. 이때  $T_0$ 는 300[K]을 나타낸다.

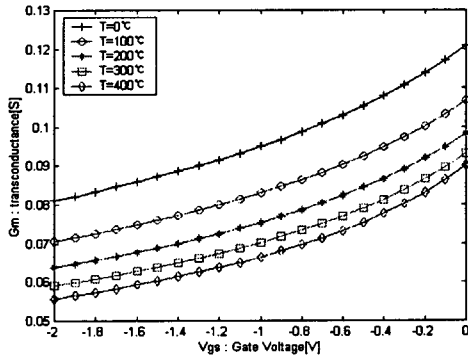


그림 3. 온도변화에 따른  $g_m$ 의 변화 ( $V_D=2V$ ).

#### 4. 온도변화에 따른 차단주파수

##### 4.1 Intrinsic 성분만을 고려한 $f_T$

일반적으로 GaAs MESFET의 소신호등가회로는 다음과 같다.

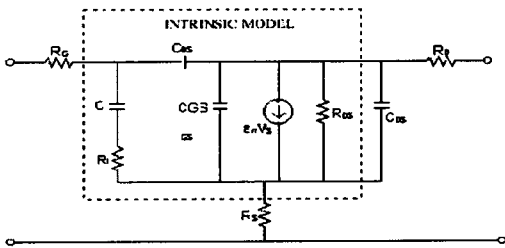


그림 4. GaAs MESFET의 소신호 등가회로.

GaAs MESFET에서 Intrinsic parameter는 바이어스 상태에 관련된 함수로써,  $g_m$ ,  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ,  $C_{ds}$ ,  $R_i$  등이 있으며, Extrinsic parameter는  $R_g$ ,  $R_s$ ,  $R_d$ ,  $C_{esd}$ ,  $C_{egs}$ ,  $C_{egd}$ ,  $L_s$  등으로 이는 바이어스 상태와

는 무관하며 소자의 구조와 관련된 함수이다.[1][4] Intrinsic 성분만을 고려한 cut-off frequency  $f_T$ 는 다음과 같이 게이트 커패시턴스  $C_g$ 와 트랜스컨덕턴스  $g_m$ 에 관한 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$f_T = \frac{g_{mi}}{2\pi \cdot C_{g(total)}} = \frac{g_{mi}}{2\pi \cdot (C_{gs} + C_{gd})} \quad (13)$$

위에서 구한 온도에 따른 정전용량값과 트랜스컨덕턴스값을 이용하여  $f_T$  값을 구하면 그림 5와 같다.

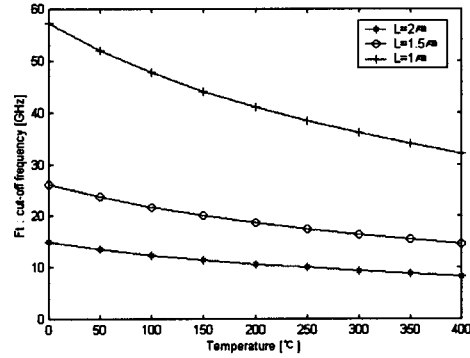


그림 5. 온도변화에 따른 Intrinsic 성분만을 고려한  $f_T$ 의 변화 ( $V_D=2V$ ,  $V_G=0V$ ,  $L$ : gate length).

##### 4.2 Intrinsic과 Extrinsic성분을 모두 고려한 $f_T$

위에서 제시한 Extrinsic 성분중 공기중으로 생기는  $C_{egs}$ ,  $C_{egd}$  성분은 그 값이 매우 작아 무시할 수 있고, substrate를 통한  $C_{esd}$  성분은 다음과 같이 구할 수 있다.[1]

$$C_{esd} = \epsilon W \cdot \frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} \quad (14)$$

$$k = \sqrt{\frac{(2L_s + L_{sd})L_{sd}}{(L_s + L_d)^2}} \quad (15)$$

$K(k)$ : Complete elliptic integral of the first kind

$L_s$ : source metal의 길이

$L_{sd}$ : source metal과 drain metal 사이의 거리

트랜스컨덕턴스  $g_m$ 에 영향을 미치는 Extrinsic 성분은 source측의 옴접촉저항값인  $R_s$ 와  $R_d$ 값이므로 이것을 고려하여  $g_m$ 을 다시 구하면 다음과 같다.[3][7]

$$g_m = \frac{g_{mi}}{1 + (R_s + R_d) \cdot g_{mi}} \quad (16)$$

일반적으로 오믹접촉저항의 값은  $2.5\Omega \sim 3.5\Omega$  정도의 값을 가지며, Pt/Ge/Au=200/400/800Å의 금속으로 오믹접촉을 했을 때 약  $3.12\Omega$  정도의 실험값을 얻을 수 있다.

이러한 Extrinsic 성분을 고려한  $f_T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi \cdot C_{g(total)}} = \frac{g_m}{2\pi \cdot (C_{gs} + C_{gd} + C_{esd})} \quad (17)$$

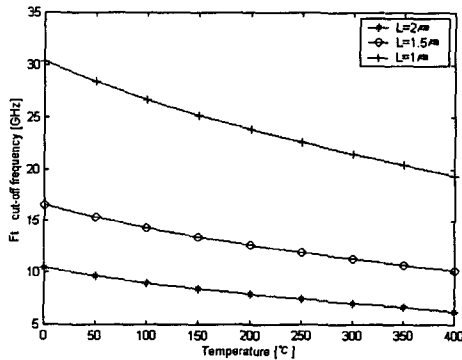


그림 6. 온도변화에 따른 Intrinsic+Extrinsic 성분을 고려한  $f_T$ 의 변화 ( $V_D=2V$ ,  $V_G=0V$ ,  $L$ : gate length).

## 5. 결 론

본 논문에서는 온도 의존성을 가지는 유효질량, 진성 캐리어 농도, 내부전압( $V_{bi}$ ), 공핍층의 두께, 이동도등을 고려하여 게이트 정전용량과 트랜스컨덕턴스를 해석적으로 제시하였으며, 이를 통해 MESFET의 차단주파수를 구하였다. 기존의 이론에서 고려하지 않은 Extrinsic 성분들을 고려한 차단주파수를 분석하여, 실제 소자에 근접한 값을 얻을 수 있었으며 이러한 해석으로 실제 회로설계에 적용할 수 있는 모델을 제시하였다.

## 참고 문헌

- [1] Nitin Jain, Ronald J. Gutmann, "Modeling and design of GaAs MESFET control devices for broad-band applications" IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 38, No 2, pp.109-117, 1990.
- [2] Stefano D'Agostino, Andrea Betti-Berutto, "Physics-based expressions for the nonlinear

capacitances of the MESFET equivalent circuit" IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 42, No 3, pp.403-406, 1994.

- [3] Trond Ytterdal, Byung-Jong Moon, Tor A. Fjeldly, and Michael S. Shur, "Enhanced GaAs MESFET CAD model for a wide range of temperatures" IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 42, No. 10, pp.1724-1734, 1995.
- [4] Gilles Dambrine, Alain Cappy, Frederic Heliodore, and Edouard Playez, "A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit" IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 36, No. 7, pp.1151-1159, 1988.
- [5] Sheng S. Li, "Semiconductor Physical Electronics" Plenum Press, 1933
- [6] M. Willander, H. L. Hartnagel, "High Temperature Electronics" Chapman & Hall, p204-229
- [7] M. Feng, D. R. Scherrer, P. J. Apostolakis, and J. W. Kruse, "Temperature dependent study of the microwave performance of  $0.25\text{-}\mu\text{m}$  gate GaAs MESFETs and GaAs pseudomorphic HEMTs" IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 43, No. 6, pp.852-860, 1996.
- [8] T. Takada, K. Tokoyama, M. Ida, T. Sudo, "A MESFET Variable-Capacitance Model for GaAs Integrated Circuit Simulation" IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-30, pp.719-724, 1982.
- [9] C. Won, H. Ahn, D. Han, M. Nokali, "DC Characteristic of MESFETs at High Temperatures" Solid-State Electronics, Vol. 43, pp.537-542, 1999.
- [10] Sadao Adachi, "GaAs and Related Materials" World Scientific, 1994.