

# 반도체 소자의 퍼지 모델

## (Fuzzy Model of Semiconductor Devices)

姜 根 澤\*, 權 泰 夏\*\*

(Geun Taek Kang and Tae Ha Kwon)

### 要 約

본 연구에서는 반도체의 black box적 모델링에 퍼지 모델을 사용할 것을 제안하며, 퍼지 모델에서 사용되는 퍼지 집합의 멤버십 함수를 간단한 구분선형 함수로 할 경우 퍼지 규칙들로 구성되었던 퍼지 모델이 간략한 한개의 식으로 표현될 수 있음을 보인다.

그리고, 반도체 소자의 퍼지 모델이 매우 정확하면서 간략한 형태를 취하고 있음을 보이기 위해, 바이폴라 트랜지스터, MOSFET, GaAs FET에 대한 퍼지 모델을 작성하고, 표준 구분선형 모델 (canonical piecewise-linear model)과 비교한다.

### Abstract

This study suggests the use of fuzzy model in the semiconductor devices modeling as a black box approach. When membership functions of fuzzy sets used in a fuzzy model are simple piecewise-linear functions, the fuzzy model can be represented in a simple equation.

To show that the fuzzy model can be very realistic and simple when used in semiconductor devices modeling, we construct fuzzy models for bipolar transistor, MOSFET and GaAs FET, and compare those with canonical piecewise-linear models.

### I. 서 론

CAD를 이용한 회로 설계에서 가장 큰 취약점은 전자 소자의 모델이다. 즉, 회로에 사용되는 소자의 모델이 없이는 컴퓨터의 시뮬레이션에 의한 회로의 해석 및 설계등이 불가능하다.

전자소자의 모델링에 대해서는 두가지 방법이 있다.<sup>(1-2)</sup> 첫째는 전자소자의 동작특성을 결정하는 물리적 메커니즘에 근거를 둔 방법이고, 둘째는 black box적인 방법으로 소자의 단자로 부터 측정된 데이터에 근거를 둔다.

첫째 방법은, 소자의 물리적 동작 메커니즘이 잘 이해되고, 그 물리적 개념이 정확히 모델에 반영될 수 있을 때, 논리적이고 신뢰할 수 있는 모델을 얻을 수 있다. 그러나 실제로는 모델화의 과정에서 간단화 시키거나 근사를 취하여, 이상적인 경우에만 적용 가능한 모델이 만들어지는 경우가 많다.

둘째의 black box적 방법은, 소자의 물리적 작동 메커니즘이 잘 알려져 있지 않거나 물리적 접근 방법이 비실용적인 경우에 사용된다. 특히, 현대의 전

\*正會員,釜山水産大學 情報通信工學科  
(Dept. of Inf. & Com. Eng., Pusan Fisheries Nat'l Univ.)

\*\*正會員,釜山水産大學 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Pusan Fisheries Nat'l Univ.)

接受日字: 1989年 8月 7日

자 소자들은 크기가 극히 작거나 마이크로파의 주파수에서 작동하는 경우가 많으며, 이러한 소자들은 강한 비선형성과 복잡한 동특성을 가지고 있으므로, 물리적 접근 방법에 의한 모델이 복잡해져 회로 시뮬레이션에서 사용할 수 없는 경우가 많다. 따라서 이러한 경우 black box 적 방법에 의한 간단한 모델이 요구된다. 또한 대부분의 biological 회로의 모델링의 경우는, 분자 수준에서 물리적 메카니즘이 필요하나, 그에 대해 잘 알려져 있지 않으므로 black box 적인 방법이 요구된다. 수 천개의 요소들로 구성되는 LSI 및 VLSI 회로들도 black box 적 방법에 의한 모델이 요구된다.

Black box 적인 접근 방법으로는 스플라인 함수 (spline function), table look-up,<sup>31</sup> 구분선형 (piecewise-linear) 모델<sup>4-6</sup> 등이 현재 사용되고 있다. 스플라인 함수를 이용하는 모델에서는 정확도를 높이기 위해 할수록 더 높은 고차의 다항식이 필요하게 되어, 계산 속도면에서 비능률적이다. table look-up 방법에 의한 모델은, 데이터를 저장하기 위한 광대한 양의 기억공간을 필요로 하는 단점이 있다. 구분 선형 함수는 일종의 일차의 스플라인 함수이며, 고차의 스플라인 함수에 비해 계산 시간은 짧지만 정확도 면에서는 상당히 떨어진다.

좋은 모델을 만들려 할 경우, 항상 모델의 간략성과 사실성의 양 측면에서 절충을 취하여야 한다. 본 논문에서는 전자소자 및 회로의 모델링에 있어 black box 적인 접근의 한 방법으로, 비교적 간단한 형태를 하면서 매우 높은 표현 능력을 갖고있는 퍼지 모델을 이용 할 것을 제안한다. 그리고, 퍼지 모델에서 사용되는 퍼지 집합이 직선으로 구성되는 멤버쉽 함수 (membership function) 를 가질 경우, 퍼지 규칙들로 구성되었던 퍼지 모델이 한개의 식으로 표현될 수 있음을 보인다. 또한 실제 퍼지 모델의 적용 예로써, 3 단자를 갖는 반도체 소자의 퍼지 모델을 몇 개 만들었으며, 그 퍼지 모델들이 간략한 형태를 하면서 뛰어난 사실성을 갖고 있음을 보인다.

## II. 퍼지 모델

### 1. 퍼지 모델의 형태

퍼지 모델의 형태로는 여러가지가 있으나,<sup>11</sup> 본 논문에서는 Takagi와 Sugeno<sup>10</sup>에 의해 제안된 퍼지 모델의 사용한다. 그 퍼지 모델은 (1)식과 같은 퍼지 규칙들로 구성되며, 표현 능력이 뛰어난 장점을 갖고 있다.<sup>11-12</sup>

$$L^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i \\ \text{then } y^i = c_0^i + c_1^i x_1 + c_2^i x_2 + \dots + c_m^i x_m \quad (1)$$

여기서,  $L^i$ 는 이 퍼지 규칙이  $i$ 번째 퍼지 규칙임을 나타내고,  $x_j$ 는 입력 변수,  $A_j^i$ 는 퍼지 집합,  $y^i$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙의 출력,  $c_j^i$ 는 결론부 (consequent) 의 계수이다.

어느 한 입력 ( $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$ )에 대한, 퍼지 모델로부터의 추론 결과  $\hat{y}$ 는 다음 식과 같이 구한다.

$$\hat{y} = \left( \sum_{i=1}^n W^i y^i \right) / \sum_{i=1}^n W^i \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 퍼지 규칙의 수,  $W^i$ 는 입력 ( $x_1^0, x_2^0, \dots, x_m^0$ )에 대한  $i$ 번째 규칙 전제부 (premise)의 적합도를 나타내며, 퍼지 집합  $A_j^i$ 의  $x_j^0$ 에서 멤버쉽치 (membership value)를  $A_j^i(x_j^0)$ 로 표현 경우,  $W^i$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$W^i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0) \quad (3)$$

간단한 예로써, 그림 1에 2개의 퍼지 규칙으로 구성된 퍼지 모델을 보인다. 그림 1에서 입력 ( $x_1^0=2, x_2^0=3$ )에 대한 규칙 1의 적합도  $W^1$ 은  $0.7 \times 0.5 = 0.35$ , 규칙 2의 적합도  $W^2$ 는  $0.4$ 이며,  $y^1$ 은  $2 - 3 \times 3 = -7$ ,  $y^2$ 는  $6 + 2 + 2 \times 3 = 14$ 이므로 추론 결과  $\hat{y}$ 는 (2)식에 의해

$$\hat{y} = (0.35 \times -7 + 0.4 \times 14) / (0.35 + 0.4) \\ = 4.2 \quad (4)$$

가 된다.

(1)식과 같은 퍼지 규칙으로 구성되는 퍼지 모델은, 입력 공간을 퍼지 분할하여 각 퍼지 부분공간을 한개의 선형식으로 표현한 형태이다. 즉 한개의 퍼지 규칙은, 전제부에서 정해지는 퍼지 부분공간 위에서 성립하는 선형 입출력 관계를 결론부에서 표현하고 있다. 따라서 이러한 퍼지 모델은, 입력 공간을 통상적으로 분할하여 표현하는 구분선형 모델에 비해 훨씬 표현능력이 뛰어나며, 시스템의 특성이 잘 파악되는 장점을 갖는다. 즉, 퍼지 규칙의 전제부들에 의해 정해지는 각 부분 공간에서, 두개 이상의 퍼지 규칙이 이용될 경우는 그 부분 공간에서 시스템이 비선형의 특성을 갖으며, 한개 만의 퍼지 규칙이 적용될 경우는 그 부분 공간에서 시스템이 선형으로 근사될 수 있음을 알 수 있다.

입출력의 데이터만을 이용하여 퍼지 모델을 인식 (identification) 하는 방법은 Sugeno와 강에 의해 발

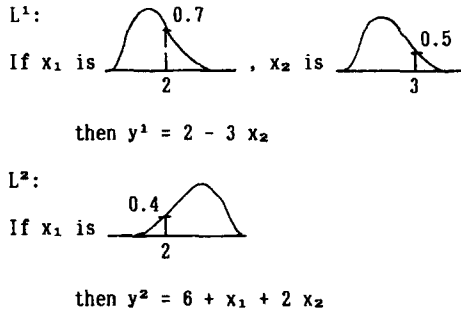


그림 1. 퍼지 모델의 예 와 입력 (2, 3)에 대한 퍼지 집합의 멤버쉽 치  
 Fig. 1. An example of fuzzy model and membership values of fuzzy sets for input (2, 3).

표 되었다.<sup>[13]</sup>

2. 퍼지 모델의 간략화

위의 퍼지 모델은 시스템을 표현하는 능력면에서는 뛰어 나지만, 모델 자체가 복잡한 규칙들로 구성되어 있어 모델의 간략성에 문제점이 있다. 즉, 퍼지 규칙들로 구성된 모델을 저장하기 위해서는 넓은 기억 공간이 필요하며, 또한 전체부 퍼지 집합의 멤버쉽 함수 (membership function)가 복잡한 형태이면 계산 시간도 길어진다.

그러나, 전체부 퍼지 집합의 멤버쉽 함수로서, 그림 2와 같은 3 가지의 구분선형 함수 형태만을 취할 경우, 퍼지 모델을 비교적 간단한 한개의 식으로 표

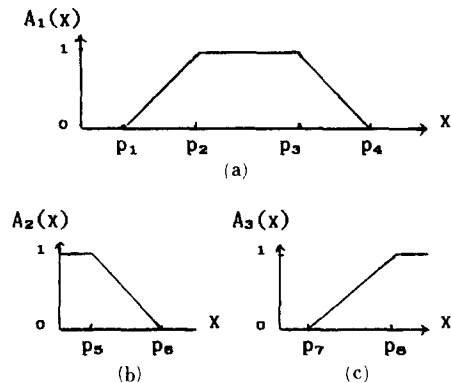


그림 2. 퍼지 모델의 전체부에 사용되는 퍼지 집합의 형태  
 Fig. 2. The fuzzy sets used premises of fuzzy models.

현할 수가 있으며, 따라서 모델을 저장하는 기억공간과 계산시간이 상당히 단축될 수 있다.

즉, 어느 한 입력 x에 대한 그림 2의 퍼지 집합 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>의 멤버쉽치 (membership value)를 A<sub>1</sub>(x), A<sub>2</sub>(x), A<sub>3</sub>(x)로 표현할 경우,

$$A_1(x) = (|x-p_1| - |x-p_2|) / (p_2-p_1) + (|x-p_3| - |x-p_4|) / (p_3-p_4) \tag{5a}$$

$$A_2(x) = 0.5 + (|x-p_5| - |x-p_6|) / 2(p_5-p_6) \tag{5b}$$

$$A_3(x) = 0.5 + (|x-p_7| - |x-p_8|) / 2(p_7-p_8) \tag{5c}$$

와 같이 표현되므로, 모델 전체를 표현하는 (2)식이 비교적 간단하게 된다.

예로써, 그림 3과 같은 3개의 퍼지 규칙으로 구성된 퍼지 모델의 경우, (2)식이 (6)식과 같이 표현된다.

$$\hat{y} = |m_1 y^1 + m_2 (m_3 y^2 + m_4 y^3)| / |m_1 + m_2 (m_3 + m_4)| \tag{6}$$

$$m_1 = 2l_2 l_3 l_4 (l_1 + |x_1 - p_1| - |x_1 - p_2|)$$

$$m_2 = l_1 (l_2 + |x_1 - p_5| - |x_1 - p_6|)$$

$$m_3 = l_4 (l_3 + |x_2 - p_7| - |x_2 - p_8|)$$

$$m_4 = l_3 (l_4 + |x_2 - p_7| - |x_2 - p_8|)$$

$$l_1 = p_1 - p_2, l_2 = p_4 - p_3, l_3 = p_5 - p_6, l_4 = p_7 - p_8$$

y<sup>1</sup>, y<sup>2</sup>, y<sup>3</sup>은 그림 3과 동일하다.

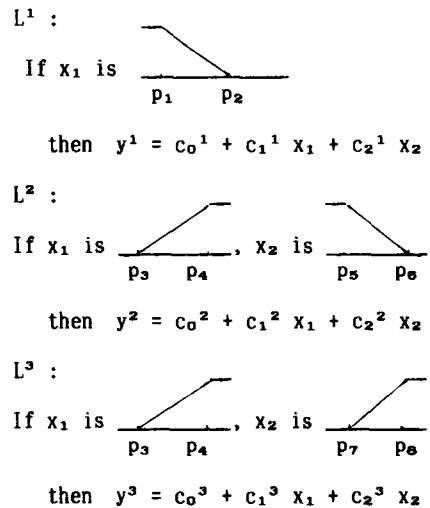


그림 3. 퍼지 모델의 예  
 Fig. 3. An example of fuzzy model.

Ⅲ. 반도체 소자의 퍼지 모델 예

본 장에서는 앞 장에서 설명한 퍼지 모델을 반도체 소자의 모델링에 응용하고자 한다. 반도체소자에 대해 해석적인 방법 또는 black box적인 방법으로 모델을 구한 예는 매우 많이 나와 있다. 여기서는, black box적인 방법이며 형태가 매우 간단한 범용(universal) 모델로 알려져 있는 표준 구분선형 모델(canonical piecewise-linear model)과 퍼지모델을 비교하여 퍼지 모델의 성능을 평가하기로 한다. 그에 따라, Chua 등에 의해 표준구분선형 모델이 구해져 있는<sup>[1]</sup> 바이폴라 트랜지스터, MOSFET, GaAs FET에 대하여 문헌 [13]에 발표된 방법으로 퍼지모델을 작성하고, II-2절에서 소개한 방법으로 모델을 한개의 식으로 변환 시키고 표준 구분선형 모델과 비교한다.

1. 바이폴라 트랜지스터의 퍼지 모델

그림 4와 같이 베이스 공통으로 접속된 npn바이폴라 트랜지스터의 에미터 전류의 퍼지 모델을 만들었다.

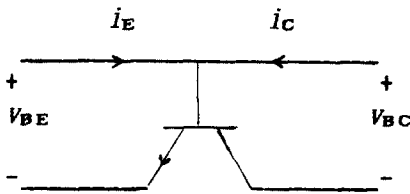


그림 4. npn 바이폴라 트랜지스터  
Fig. 4. 2-port configuration of the npn bipolar transistor.

모델 작성에 사용된 데이터는 트랜지스터의 단자에서 직접 측정된 값이 아니고, 트랜지스터의 전류 전압 특성이 Ebers-Moll식<sup>[14]</sup>을 따른다고 가정하여, (7)식으로 부터 구한 값이다.

$$i_E = I_s \{ \exp(u_{BE}/V_T) - 1 \} / \alpha_f - I_s \{ \exp(u_{BC}/V_T) - 1 \} \quad (7)$$

$$I_s = 10^{-14} \text{ A}, V_T = 26 \text{ mV}, \alpha_f = 0.99, \alpha_r = 0.5$$

(7)식에서  $u_{BE}$ 와  $u_{BC}$ 를 각각 0.4V에서 0.7V 까지 0.015V씩 변화시키면서,  $i_E$ 에 대해 441조(組)의 데이터를 구하여 퍼지 모델을 작성한 결과 그림 5와 같은 퍼지 모델이 구해졌다.

그림 5의 퍼지 모델에서, 각 퍼지 규칙들이 적용되는 퍼지 부분공간들을 그림 6에 나타낸다. 그림 6

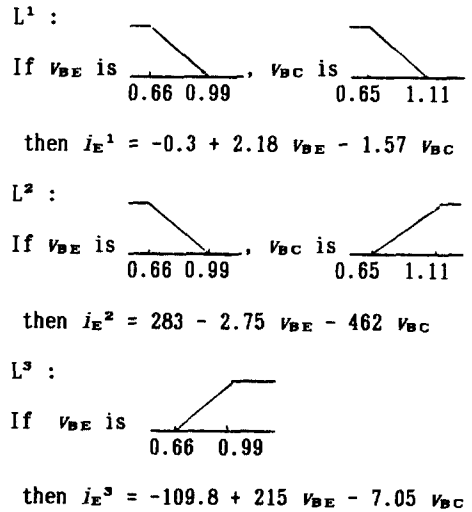


그림 5.  $i_E$ 의 퍼지 모델  
Fig. 5. The fuzzy model for  $i_E$ .

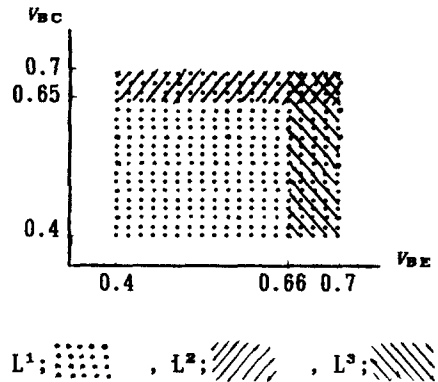


그림 6. 그림 5의 퍼지 규칙들이 적용되는 퍼지 부분공간들  
Fig. 6. Fuzzy subspaces for fuzzy rules of fuzzy model Fig. 5.

에서, 2개 이상의 퍼지 규칙이 적용되는 부분공간에서는 비선형이 된다.

그림 5의 퍼지 모델을 한개의 식으로 표현하면 (8)식과 같이 된다.

$$i_E = | 2 - 1.515 (|v_{BE} - 0.66| + v_{BE}) \{ [1.707 - 1.087 (|v_{BC} - 0.65| + v_{BC}) \{ y_1 + y_2 \} + y_3 ] \} |$$

$$y_1 = -283.6 + 4.929 v_{BE} + 460.6 v_{BC}$$

$$y_2 = 393.1 - 217.3 v_{BE} - 455.1 v_{BC}$$

$$y_3 = -109.8 + 214.6 v_{BE} - 7.047 v_{BC} \quad (8)$$

그림 5의 퍼지 모델은, 그림 3의 모델과 같이 3개의 퍼지 규칙으로 구성되어 있지만, 전체부 퍼지 집합의 파라미터가 같은 경우가 많으므로, 한개의 식으로 표현하면 (8)과 같이 (6)식에 비해 훨씬 간단한 형태로 되었다.

모델의 오차를 나타내기 위하여 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$E = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / N \quad (9)$$

여기서, N은 데이터의 수,  $y_i$ 는 모델 작성에 사용된 데이터,  $\hat{y}_i$ 는  $y_i$ 에 대한 모델의 추정치이다. 본 예에서는 (7)식의 Ebers-Moll 모델의 데이터를 이용하였으므로, Ebers-Moll 모델에 대한 오차를 구한 결과, (8)식의 퍼지 모델은 0.43이었고, Chua의 표준 구분선형 모델은 0.129이었다. 그림 7에 Ebers-Moll 모델, 표준 구분선형 모델, 퍼지 모델들로부터 구한 에미터 전류를 보인다.

(9)식의 오차와 그림 7에서 보는 바와 같이 퍼지 모델이 표준 구분선형 모델에 비하여 정확도 면에서 훨씬 뛰어나면서, 모델의 간략성에서는, (8)식의 퍼지 모델과 Chua 등의 표준 구분선형 모델<sup>[1]</sup>을 비교하면 별 차이가 없음을 알 수 있다.

### 2. MOSFET의 퍼지 모델

그림 8과 같이 MOSFET가 소오스 공통으로 접속되어 있을 때, 드레인 전류  $i_D$ 의 퍼지 모델을 작성하였다. 모델의 인식에 사용된 데이터는, MOSFET가 Shichman-Hodges 모델<sup>[16]</sup>을 따른다고 가정하여 (10)식으로 부터 구하였다.

$$i_D = k \{ (v_{GS} - V_t) v_{DS} - 0.5 v_{DS}^2 \}; \text{if } v_{DS} < v_{GS} - V_t$$

$$i_D = 0.5k (v_{GS} - V_t)^2 \{ 1 + \lambda (v_{DS} - v_{GS} + V_t) \}; \text{otherwise}$$

(10)

여기서,  $k = 50 \mu A/V^2$ ,  $V_t = 1V$ ,  $\lambda = 0.02V^{-1}$

(10)식에서,  $v_{GS}$ 를 1V에서 6V까지,  $v_{DS}$ 를 0V에서 5V까지 각각 0.45V씩 증가 시키면서 441조(組)의 데이터를 구하여,  $i_D$ 에 대한 퍼지 모델을 작성한 결과 그림 9와 같은 모델이 구해졌다.

그림 9의 퍼지 모델을 한개의 식으로 표현하면 (11)식과 같이 된다.

$$i_D = \{ m_1 i_D^2 + m_2 (m_3 i_D^2 + m_4 i_D^3) \} / \{ m_1 + m_2 (m_3 + m_4) \}$$

$$m_1 = 5974 - 826.8 v_{GS}$$

$$m_2 = -7.031 (-1.669 + |v_{GS} - 1.669| + v_{GS})$$

$$m_3 = 6.478 (-4.213 + v_{DS} - |v_{DS} - 4.213|) \quad (11)$$

$$m_4 = -5.742 (8.007 + v_{DS} - |v_{DS} - 4.949|)$$

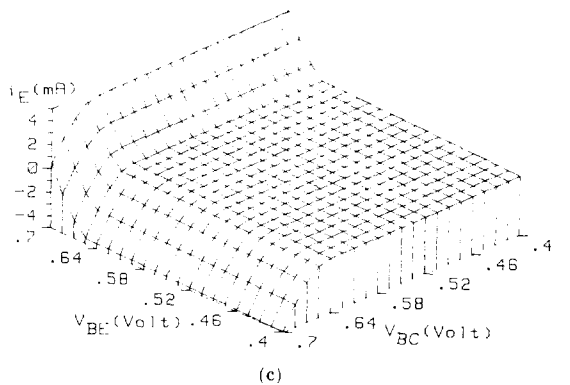
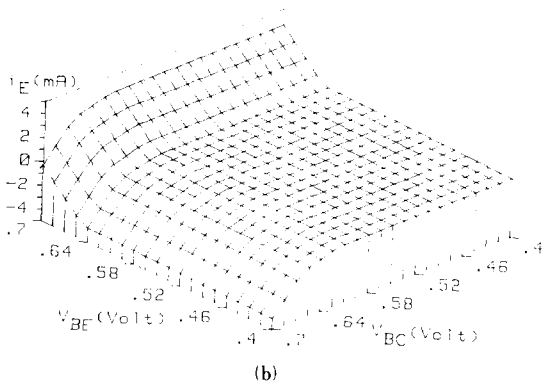
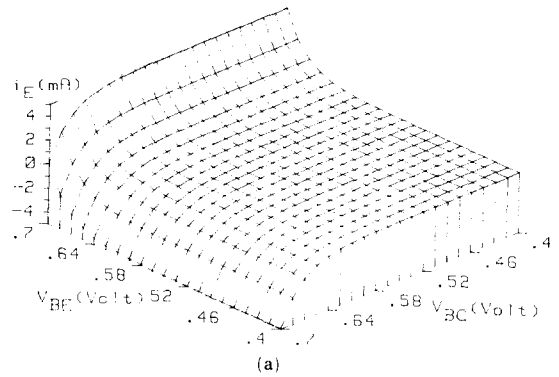


그림 7. (a) (7)식의 Ebers-Moll 모델에서 구한 에미터 전류  
 (b) Chua의 표준 구분선형 모델<sup>[1]</sup>에서 구한 에미터 전류  
 (c) (8)식의 퍼지 모델에서 구한 에미터 전류

Fig 7. (a) The emitter current in the Ebers-Moll model given by (7).  
 (b) The emitter current in the canonical piecewise-linear model given by Chua<sup>[1]</sup>.  
 (c) The emitter current in the fuzzy model given by (8).

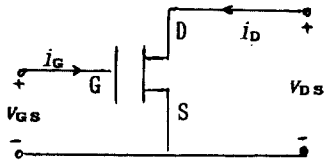
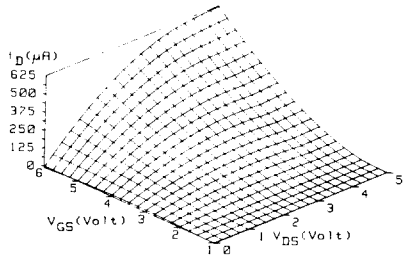
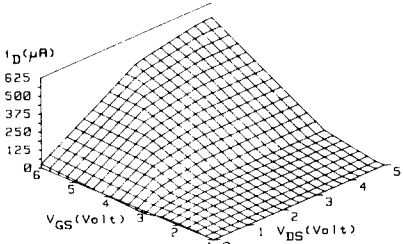


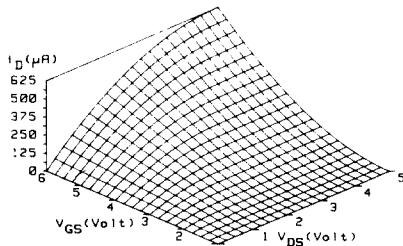
그림 8. MOSFET의 접속도  
Fig. 8. The configuration of MOSFET.



(a)



(b)



(c)

$L^1$  :

If  $V_{GS}$  is

then  $i_D^1 = -11.3 + 9.47 V_{GS} + 0.67 V_{DS}$

$L^2$  :

If  $V_{GS}$  is ,  $V_{DS}$  is

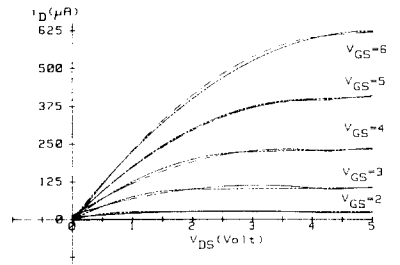
then  $i_D^2 = 83.38 - 59.8 V_{GS} + 208 V_{DS}$

$L^3$  :

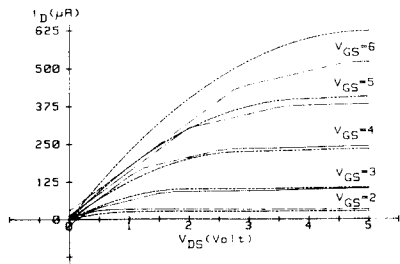
If  $V_{GS}$  is ,  $V_{DS}$  is

then  $i_D^3 = -93 + 142 V_{GS} - 1.6 V_{DS}$

그림 9.  $i_D$ 의 퍼지 모델  
Fig. 9. The fuzzy model for  $i_D$ .



(d)



(e)

그림 10. (a) (10)식의 Shichman-Hodges 모델로부터 구한 드레인 전류  
(b) Chua의 표준 구분선형 모델<sup>[8]</sup>로부터 구한 드레인 전류  
(c) (11)식의 퍼지 모델로부터 구한 드레인 전류  
(d) Schichman-Hodges 모델 (직선)과 표준구분선형 모델 (점선)과의 비교  
(e) Schichman-Hodges 모델 (직선)과 퍼지모델 (점선)과의 비교  
Fig. 10. (a) The drain current in the Shichman-Hodges model given by (10).  
(b) The drain current in the canonical piecewise-linear model given by Chua<sup>[8]</sup>.  
(c) The drain current in the fuzzy model given by (11).  
(d) Comparison between the Shichman-Hodges model (solid line) and the canonical piecewise-linear model (dashed line).  
(e) Comparison between the Shichman-Hodges model (solid line) and the fuzzy model (dashed line).

$i_D^1, i_D^2, i_D^3$ 은 그림 9 와 동일하다.

(11)식의 퍼지 모델과, Chua가 구한 표준 구분선형 모델<sup>11)</sup>에 대해, (9)식의 오차를 구한 결과, 표준 구분선형 모델은 678.4인데 비해 퍼지 모델은 27.27로 매우 낮았다. 그림 10에 Shichman-Hodges 모델, 표준 구분선형 모델, 퍼지 모델로부터 구한 드레인 전류를 보인다.

3. GaAs FET의 퍼지 모델

이온 주입식 (ion-implanted) GaAs FET의 해석적 인 모델에 대해 Chen 등<sup>11)</sup>이 발표한 측정 데이터를 이용하여, GaAs FET의 드레인 전류의 퍼지 모델을 만들었다. 그림 11에 드레인 전류의 측정 데이터와 해석적 모델<sup>11)</sup>로부터 구한 결과를 보인다. 그림 11의 측정 데이터를 이용하여 작성된 퍼지 모델을 그림 12에 보인다.

그림 12의 퍼지 모델을 한개의 식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$i_D = |m_1 i_D^1 + m_2 (m_3 i_D^2 + m_4 i_D^3)| / |m_1 + m_2 (m_3 + m_4)|$$

$$m_1 = 357.8 - 275.2 v_{GS}$$

$$m_2 = -4.89 (2.17 + |v_{GS} + 2.17| + v_{GS})$$

$$m_3 = 5.36 (-0.06 + v_{DS} - |v_{DS} - 0.06|)$$

$$m_4 = -3.7 (v_{DS} + 9 - |v_{DS} - 1.72|) \quad (12)$$

$i_D^1, i_D^2, i_D^3$ 은 그림 12와 동일하다.

(12)식의 퍼지 모델과 Chua의 표준 구분선형 모델<sup>11)</sup>의 결과를 그림 13에 보인다. (9)식을 이용하여 오차

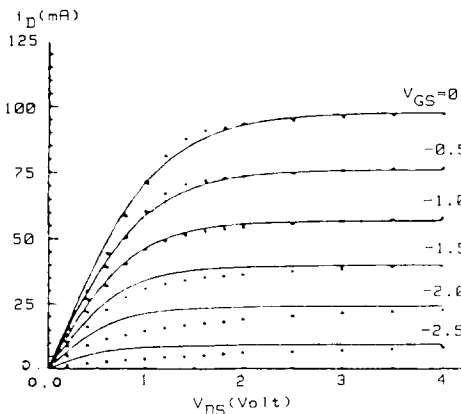


그림 11. 드레인 전류의 측정치(점)와 해석적 모델에 의한 추정치(직선)  
 Fig. 11. The drain current in the analytical model (solid line) and the measured data (point).

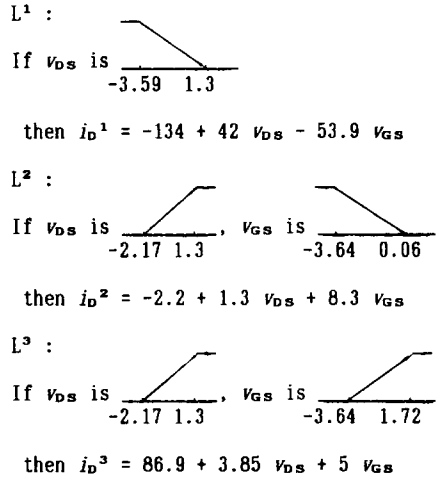


그림 12. 그림 11의 측정 데이터를 이용한 퍼지 모델  
 Fig. 12. The fuzzy model by the measured data shown in Fig. 11.

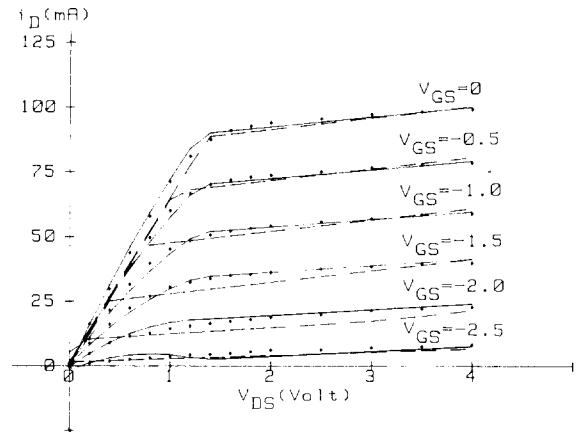


그림 13. 드레인 전류의 측정치(점), 퍼지 모델에 의한 추정치(직선), 표준 구분선형 모델에 의한 추정치(점선)  
 Fig. 13. Comparison of the fuzzy model (solid line), the canonical piecewise-linear model (dashed line), and the measured data (point).

를 구하면, 표준 구분선형 모델은 8.014인데 비해 퍼지 모델은 1.68이었다.

IV. 결 론

컴퓨터의 시뮬레이션을 이용한 전자회로의 설계 및 해석에서 중요한 문제의 하나가 전자 소자 및 회로의 모델이다. 본 논문에서는 반도체 소자의 black

box적인 모델의 하나로 퍼지 모델을 이용할 것을 제시하였으며, 퍼지 모델의 전제부에서 사용하는 퍼지 집합의 멤버십 함수의 형태를 3 가지의 특수한 구분선형 함수로 제한할 경우 퍼지 모델이 비교적 간단한 식으로 표현될 수 있음을 알았다.

바이폴라 트랜지스터, MOSFET, GaAs FET 에 대해 퍼지 모델을 작성한 결과, 퍼지 모델의 오차가 표준 구분선형 모델의 오차에 비해, 바이폴라 트랜지스터의 경우 1/3, MOSFET의 경우 1/25, GaAs FET의 경우 1/4.8로 나타나 퍼지 모델이 정확도면에서 매우 뛰어난을 알 수 있었다. 그리고 모델의 간략성면에서는 퍼지 모델과 표준 구분선형 모델 사이에 별 차이가 없었다. 한편 퍼지 모델을 규칙 형태로 표현하면, 퍼지 규칙의 전제부에 의해 정해지는 부분 공간들에서 반도체 소자가 어떠한 특성(선형 또는 비선형)을 갖는가를 알 수 있었다.

본 연구에서 사용한 퍼지 모델은, 다른 전자 소자 및 회로의 모델링에도 이용될 수 있으리라 생각되며, 앞으로의 연구 과제로 생각된다.

#### 參 考 文 獻

- [1] L.O. Chua, "Device modeling via basic nonlinear circuit elements," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-27, no. 11, pp. 1014-1044, Nov. 1980.
- [2] L.O. Chua, "Nonlinear circuits," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-31, no. 1, pp. 69-87, Jan. 1984.
- [3] T. Shima, T. Sugawara, S. Moriyama, and H. Yamada, "Three-dimensional table look-up MOSFET model for precise circuit simulation," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-17, pp. 449-454, June 1982.
- [4] L.O. Chua, "Modeling of three-terminal devices: a black box approach," *IEEE Trans. Circuit Theory*, vol. CT-19, pp. 555-562, Nov. 1972.
- [5] M.J. Chien and E.S. Kuh, "Solving nonlinear resistive networks using piecewise-linear analysis and simplicial subdivision," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-24, pp. 305-317, Jan. 1977.
- [6] L.O. Chua and R. Ying, "Canonical piecewise-linear analysis," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-30, pp. 125-140, Mar. 1983.
- [7] L.O. Chua and A.C. Deng, "Canonical piecewise-linear analysis: part II-Tracing driving-point and transfer characteristics," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-32, pp. 417-444, May 1985.
- [8] L.O. Chua and A.C. Deng, "Canonical piecewise-linear modeling," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, pp. 511-525, May 1986.
- [9] 寺野寿郎, 浅居喜代治, 菅野道夫, "ファジィシステム入門, オーム社, 1987.
- [10] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of system and its application to modeling and control," *IEEE Trans. System, Man and Cybernetics*, vol. 15, pp. 115-132, 1985.
- [11] M. Sugeno and G.T. Kang, "Fuzzy modeling and control of multilayer incinerator," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 18, pp. 326-346, 1986.
- [12] 姜根澤, 菅野道夫, "ファジィモデリング", 日本計測自動制御学会論文集, vol.23, No. 6, pp. 650 - 652, 1987.
- [13] M. Sugeno and G.T. Kang, "Structure identification of fuzzy model," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 28, pp. 15-33, 1988.
- [14] J.J. Ebers and J.L. Moll, "Large signal behavior of junction transistors," *Proc. IRE*, vol. 42, pp. 1761-1772, Dec. 1954.
- [15] H. Shichman and D.A. Hodges, "Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits," *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. SC-3, pp. 285-289, Sept. 1968.
- [16] T. Chen and M.S. Shur, "Analytical models of ion-implanted GaAs FET's," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-32, no. 1 Jan. 1985.



## 著者紹介



姜 根 澤(正會員)

1953年 3月 12日生. 1976年 서울  
대학교 응용물리학과 공학사 취득.  
1984년 일본 동경공업대학 공학석  
사 취득. 1987년 일본 동경공업대  
학 공학박사 취득. 1987년 9月~

부산수산대학교 정보통신공학과 전  
임강사. 주관심분야는 퍼지 집합 이론 응용, 비선형  
시스템 및 제어 등임.

權 泰 夏 (正會員) 第25卷 第3號 參照

현재 부산수산대학교 전자공학과 부교  
수.