

DC 순방향 바이어스 인가조건에서 Schottky 다이오드의 SPICE 모델 파라미터 추출 방법에 관한 연구

The Study on the SPICE Model Parameter Extraction Method for the Schottky Diode Under DC Forward Bias

이 은 구*
(Un-Gu Lee)

Abstract - The method for extracting the SPICE model parameter of Schottky diode under DC forward bias is proposed. A method for improving the accuracy of the SPICE model parameter at various temperatures is proposed. Three analysis steps according to the magnitude of the current is used in order to extract the parameters effectively. At each analysis step, initial parameters are calculated by using the current-voltage equations and the Levenberg-Marquardt analysis is proceeded. To verify the validity of the proposed method, the SPICE model parameters for the BAT45 and FSV1045 under DC forward bias is extracted. Schottky diode currents obtained from the proposed method shows the average relative error of 6.1% and 9% compared with the measured data for the BAT45 and FSV1045 sample at various temperatures.

Key Words : Schottky diode, SPICE model parameter, Levenberg-Marquardt analysis, Parameter extraction

1. 서 론

IT 기기의 동작 속도가 증가함에 따라 기기에 사용되는 칩의 구동 전압이 낮아지고 있으며 이로 인해 전원 소자의 전력 손실이 작아지는 추세이다. 모바일 기기에 사용되는 전원장치는 소형화 및 경량화되고 있어 이러한 기능을 지원할 수 있는 Switching Regulator의 사용이 늘고 있다. Switching Regulator를 소형화함과 동시에 높은 전류 구동능력을 제공하기 위해서는 가능한 높은 주파수에서 동작하도록 회로 설계해야하기 때문에 저손실 고주파 동작이 가능한 Schottky 다이오드[1] 소자를 사용해야 한다.

일반적으로 Switching Regulator를 이용하여 대 전력을 제어하는 냉장고, 에어컨용 모터 제어 IC와 하이브리드 자동차용 인버터 모듈은 discrete 전력제어부품[2]과 이를 제어하는 고전압 IC로 구성되는 반면에, 음성전력 증폭기는 하나의 칩으로 제작한다[3, 4]. 모터 구동 IC, 잉크젯 프린터와 switching regulator는 5[V] 이상의 입출력 interface가 필요하며[5], 신호를 처리하는 저 전압 회로와 높은 전압에서 동작하는 출력 회로를 분리하여 설계한다. Schottky 다이오드 용 SPICE DC 모델 파라미터의 정확한 값이 주어진다면 칩 사이즈가 작으면서도 고전력 전원을 공급할 수 있는 Switching Regulator의 정교한 회로의 설계가 가

능하다.

Schottky 다이오드의 SPICE 파라미터를 추출하기 위해서는 인가전압에 대한 전류 측정치로부터 DC SPICE 모델 파라미터를 수학적으로 계산하는 방법을 사용하고 있으나, Schottky 다이오드가 동작되는 전위 영역 전체에 걸쳐 SPICE 모델 파라미터를 정교하게 계산할 수가 없다. 또한 기존에 사용된 SPICE 파라미터 추출방법은 특정한 온도 조건에 대해서 추출과정을 진행하기 때문에 온도 파라미터의 정확도에 한계를 갖는다.[6] 특히 저온에서부터 고온의 넓은 동작 온도 범위에서 회로 동작하는 Schottky 다이오드의 경우 인가전위에 대한 전류 값이 많은 오차를 포함하고 있어 이를 줄이기 위한 체계적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 다양한 온도조건에서도 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터를 정교하게 추출할 수 있는 방법을 제안한다. 특히 높은 전류가 흐르는 영역에서 해의 정확도를 높이기 위해 내부저항의 온도특성 이용 방법과 SPICE 파라미터의 초기해 설정 방법을 제안한다. 본 논문에서는 해의 정확도를 높이기 위해 초기해 설정 후 Levenberg-Marquardt 해석[7]을 진행한다. 제안된 방법의 정확도를 검증하기 위해 BAT45와 FSV1045 시료에 대한 전류 측정치와 SPICE를 이용한 계산된 전류 값을 비교한다.

2. Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델

Schottky 다이오드는 금속과 반도체가 금속학적 접합을 형성함으로써 전류를 한쪽 방향으로만 흐르게 하는 정류특성을 이용

* Corresponding Author : Dept. Information & Communication
Bucheon Univ., Korea

E-mail : leg@bc.ac.kr

Received : January 6, 2016; Accepted : February 24, 2016

하는 소자로서 전위장벽이 낮은 전기적 특성을 갖는 다이오드 소자이다. pn 접합 다이오드에 비해 전위장벽이 낮기 때문에 순방향 전위가 인가된 조건에서 다이오드 양단에 낮은 전압 강하를 필요로 하는 회로소자로 많이 사용된다. 식 (1)은 Schottky 다이오드에 DC 전압이 인가된 조건에 대한 전류식이다[6].

$$I_{Schottky} = I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{V_d}{NV_t}} - 1 \right) \quad (1.a)$$

$$I_S(T) = A_{eff} T^2 \cdot e^{-\frac{\phi_B}{V_t}} \quad (1.b)$$

여기서 A_{eff} 는 유효 Richardson 상수이고 순방향 Saturation 전류 $I_S(T)$ 는 온도의 함수이다.

Schottky 다이오드는 pn 접합 다이오드의 전기적인 특성을 갖고 있기 때문에 SPICE에서 제공하는 다이오드 모델을 이용하여 인가전압에 대한 전류 식으로 사용할 수 있다. 식 (2)는 SPICE에서 제공하는 다이오드 모델이다. 식 (1)에서 사용하는 Schottky 다이오드의 DC 전류-전압 관계식과 유사한 형태를 갖는다[8].

$$I_d = I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{V_d}{NV_t}} - 1 \right) \quad (2.a)$$

$$I_S(T) = I_S \left\{ \frac{T}{T_{nom}} \right\}^{\frac{X_{Ti}}{N}} \cdot e^{\left(\frac{T - T_{nom}}{T_{nom}} \right) \frac{E_g}{NV_t}} \quad (2.b)$$

$$\frac{V_d - V}{R_S} + I_d = 0 \quad (2.c)$$

여기서 $I_S(T)$ 는 순방향 Saturation 전류이고 온도의 함수이다. 식 (2.b)의 X_{Ti} 와 E_g 값을 Schottky 다이오드 특성에 적합하도록 설정하면 식 (1.b)의 온도에 대한 Schottky 다이오드의 순방향 Saturation 전류특성을 나타낼 수 있다. N 이 1에 근사한 값을 갖는 경우 X_{Ti} 는 2에 근사한 값을 갖고 E_g 는 Schottky 전위장벽에 근사한 값을 갖는다. 식 (2.a)를 이용하면 low level injection 전류가 흐르는 영역에서 Schottky 다이오드의 DC 전류-전압 특성을 비교적 정교하게 예측할 수 있으나 high level injection 전류가 흐르는 영역에서는 식 (2.a)는 정확도에 한계를 갖는다. Schottky 다이오드는 반도체 접합 영역의 불순물 농도가 높지 않다면 큰 내부저항을 갖는다. SPICE의 다이오드 모델은 많

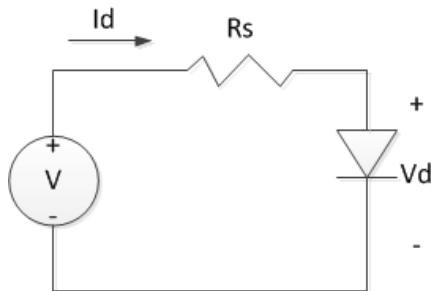


그림 1 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델
Fig 1 DC SPICE model of the Schottky diode

은 전류가 흐르는 동작영역에서 내부 저항의 영향을 고려하기 위해 다이오드에 직렬로 R_S 저항을 연결한다.

식 (2.c)는 내부저항 R_S 를 고려한 Schottky 다이오드의 SPICE 해석용 수식이다. 그림 1은 Schottky 다이오드의 DC SPICE 해석용 모델이다. SPICE에서 제공하는 내부저항은 온도가 변하는 조건에서도 상수 값으로 고정되어 있기 때문에 다양한 온도조건에 대해 전류-전압관계를 정교하게 예측할 수 없다는 단점을 갖는다.

3. 온도특성을 고려한 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델

본 논문에서는 PSPICE에서 사용하는 다이오드 모델을 이용하여 다양한 온도조건에서도 Schottky 다이오드의 DC 전류-전압 특성을 비교적 정교하게 예측할 수 있는 방법을 제안한다. PSPICE에서 사용하는 다이오드 모델은 high level injection 전류 모델을 포함하고 있으며 온도 특성을 고려한 내부저항을 사용한다. 식 (3)은 Schottky 다이오드 해석용 DC 전류 모델이다[9].

$$I_d = I_n \sqrt{\frac{I_{KF}}{I_{KF} + I_n}} \quad (3.a)$$

$$I_n = I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{V_d}{NV_t}} - 1 \right) \quad (3.b)$$

$$I_S(T) = I_S \left\{ \frac{T}{T_{nom}} \right\}^{\frac{X_{Ti}}{N}} \cdot e^{\left(\frac{T - T_{nom}}{T_{nom}} \right) \frac{E_g}{NV_t}} \quad (3.c)$$

$$\frac{V_d - V}{R_S(T)} + I = 0 \quad (3.d)$$

일반적으로 Schottky 다이오드 콘택을 만들기 위해서 금속학적 접합을 형성하는 반도체 영역의 불순물 농도가 높지 않기 때문에 내부저항은 무시할 수 없는 값을 갖고 있으며 온도가 증가하면 큰 폭으로 증가한다. 식 (4)는 온도의 변화를 고려한 내부저항이고 식 (3.d)에 사용된다[9].

$$R_S(T) = R_S \{ 1 + T_{RS1}(T - T_{nom}) + T_{RS2}(T - T_{nom})^2 \} \quad (4)$$

I_{KF} 는 고농도의 반송자가 주입되는 high-level injection 전류를 계산하기 위해 파라미터이다. 식 (5)는 온도의 변화를 고려한 I_{KF} 이다[9].

$$I_{KF}(T) = I_{KF} \{ 1 + T_{IKF1}(T - T_{nom}) \} \quad (5)$$

4. Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터 추출 방법

Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터 추출과정은 그림 2와 같이 3단계로 구성된다. low level injection 전류가 흐르는 영역, high level injection 전류가 흐르는 영역과 저항에 의해

전류가 감소하는 영역으로 나눌 수 있다. 편의상 각 해석영역을 영역 1, 영역 2와 영역 3으로 나누어 진행한다. 영역 1은 인가전압이 낮은 조건이고 흐르는 전류가 작기 때문에 내부저항의 영향을 받지 않는다. 영역 2는 N 이 2에 근접한 값을 갖는 영역이다. 영역 3은 대 전류가 흐르는 영역으로 내부저항의 영향을 많이 받는 해석 영역이다. 영역 2와 영역 3의 구분이 명확하지 않기 때문에 영역2를 해석한 후 영역 2와 영역 3을 동시에 진행한다.

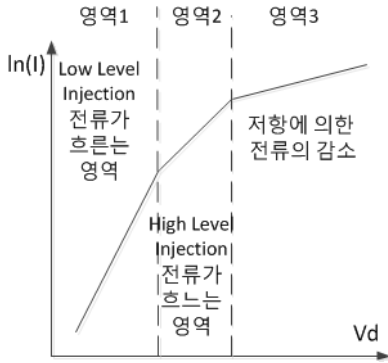


그림 2 SPICE 모델 파라미터의 추출 3단계
 Fig 2 Three regions of the SPICE model parameter extraction

영역 1은 저 전압이 인가된 조건에서 순방향 Saturation 전류 I_s 와 emission 계수 N 을 계산하는 단계이다. I_s 는 온도의 함수이고 X_{TI} 와 E_g 를 이용하여 식 (1.b)를 구현한다. 영역 1은 초기해 설정 과정과 Levenberg-Marquardt 해석 과정으로 구성된다.

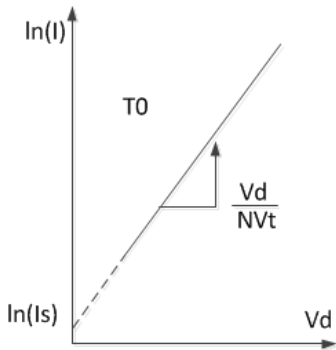


그림 3 상온에서 Schottky 다이오드의 전류-전압 곡선
 Fig 3 The I-V curve of Schottky diode at room temperature

그림 3은 상온에서 Schottky 다이오드의 전류-전압 관계를 나타낸다. 식 (6)은 그림 3의 전류-전압곡선을 나타내는 식이고 저 전류조건에서 식 (3.a)의 양변을 로그 함수로 변환한다. 그림 3에서 표시한 것과 같이 직선의 기울기와 y 축과의 절점을 이용하여 N 과 I_s 을 계산할 수 있다.

$$\ln(I_d) = \ln(I_s) + \left\{ \frac{V_d}{NV_t} \right\} \quad (6)$$

식 (7)은 식 (3.c)의 양변을 로그함수로 변환한 식이다. 다양한 온도조건에 대한 전류-전압 식 (7)을 만들고 이를 연립하면 X_{TI} , E_g 의 초기해를 구할 수 있다. 초기해를 계산하기 위해서는 상온을 포함한 3개 이상의 온도조건이 필요하다.

$$\ln \left\{ \frac{I_s(T_i)}{I_s(T_0)} \right\} = \left(\frac{X_{TI}}{N} \right) \ln \left(\frac{T_i}{T_{nom}} \right) + \left(\frac{T_i - T_{nom}}{T_{nom}} \right) \frac{E_g}{NV_{t_i}} \quad (7)$$

여기서 T_i 는 T_0, T_1, T_2 등 온도조건을 나타낸다. $\ln(I_d)$ 와 V_d 에 대한 1차 방정식의 형태를 갖고 있으며 y 축 절점을 이용하여 I_s 를 구할 수 있다. 그림 4는 다양한 온도조건에서 전류-전압 곡선이다. 식 (7)에서 N 과 I_s 는 상온 조건에서 계산된 값을 사용한다. 계산된 초기해와 식 (6)에 이용하여 Levenberg-Marquardt 해석을 진행하면 최적화된 I_s, N, X_{TI}, E_g 를 구할 수 있다.

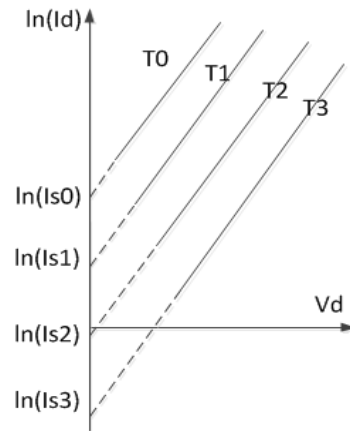


그림 4 영역 1에서 4개 온도조건에서 전류-전압 곡선
 Fig 4 The I-V curves at four temperature conditions in region 1

영역 2는 emission 계수 N 이 저 전압의 2배가 되는 조건에서 high-level injection knee 전류성분인 I_{KF} 를 계산하는 단계이다. 식 (3.a)에서 저 전류 항 $\ln I$ 이 I_{KF} 와 비교하여 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 갖는 조건에서 N 은 저 전압 조건에서 계산된 값의 2배가 된다. 이 조건에서 식 (3.a)는 식 (8)로 근사되고 식 (8)의 양변을 로그함수로 변환하면 식 (9)가 된다.

$$I_d \approx I_s \sqrt{I_{KF}} \cdot e^{\frac{V_d}{2NV_t}} \quad (8)$$

$$\ln(I_d) = \ln \left(I_s \cdot \sqrt{I_{KF}} \right) + \left\{ \frac{V_d}{2NV_t} \right\} \quad (9)$$

그림 5는 인가된 전압에 대해 선형관계를 갖는 로그 함수로 변환된 전류 식 (9)를 표시한다. 식 (9)는 영역 2에서 유도된 함수이고 영역 1에서는 점선으로 표시한다. 그림 5에 표시한 y 절점에 관한 식 (10)을 이용하여 I_{KF} 의 초기해를 계산한다. 온도예

따라 I_{Kf} 계산한 후 $I_{Kf}(T_i)$ 에 대해 연립하면 I_{Kf} 와 T_{Kf} 의 초기값을 계산할 수 있다.

$$\ln(I_{ki}) = \ln\{I_S(T_i) \cdot \sqrt{I_{Kf}(T_i)}\} \quad (10)$$

식 (9)에서 $\ln(I_d)$ 와 V_d 에 대한 1차 방정식의 형태를 갖고 있으므로 $\ln(I_d)$ 축과 만나는 전류 값을 계산함으로써 I_{Kf} 를 계산할 수 있다. 계산된 초기해와 식 (8)을 이용하여 Levenberg-Marquardt 해석을 진행하면 I_{Kf} 와 T_{Kf} 를 구할 수 있다.

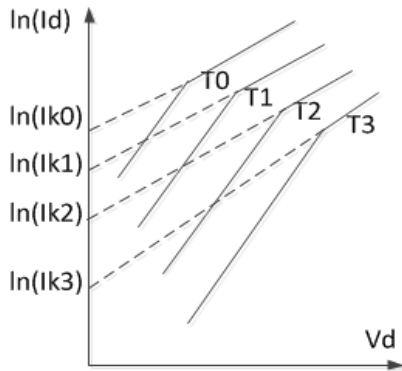


그림 5 영역 2에서 4개 온도조건에서 전류-전압 곡선
Fig 5 The I-V curves at four temperature conditions in region 2

영역 3은 high-level injection 영역에서 내부저항을 계산하는 단계이다. 대규모 전류가 유입되는 조건에서는 작은 내부저항으로도 인가전위가 큰 폭으로 감소하기 때문에 내부저항 효과를 정교하게 고려해야 한다. 식 (3.d)를 식 (8)에 대입하면 식 (11)이 된다. 영역 3에서 인가전압에 대한 전류를 식 (11)에 대입하면 온도에 따른 내부저항의 초기해를 계산할 수 있다. 식 (11)에서 I_d 는 양변에 포함이 되어 있어 비선형 함수의 형태를 갖는다.

$$\ln(I_d) = \ln(I_S) \left\{ \frac{V_d - I_d \cdot R_S(T)}{2NV_t} \right\} \quad (11)$$

내부저항에 대한 초기해를 계산한 후 식 (3.d)와 식 (8)을 이용하여 Levenberg-Marquardt 해석을 진행한다. 그림 1은 영역 3의 해석을 진행하기 위한 SPICE 회로도이다.

5. Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터 추출 알고리즘

Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터 추출하기 위해 3단계에 걸쳐 해석을 진행한다. 1단계에서 영역 1의 해석이 진행되고 비선형 특성이 강한 I_S , N , X_{Ti} , E_g 를 구하기 위해 초기해 설정 후 Levenberg-Marquardt 해석을 진행한다. 2단계와 3

단계에서 영역 2와 영역 3의 해석이 진행되고 2단계와 3단계의 해석이 진행 된 후 전체 영역에 대한 해의 수렴조건을 확인 한다. 수렴조건을 만족하지 못하면 1단계에서부터 해석을 반복한다. 이때 해석을 반복하는 경우 초기해는 전단계의 해석으로부터 계산된 값을 이용한다.

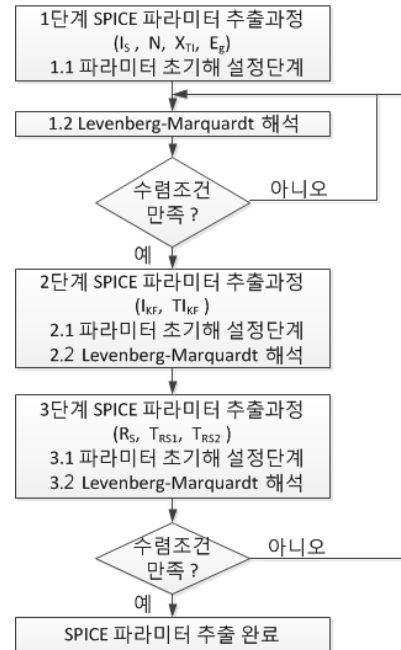


그림 6 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터 추출 알고리즘

Fig 6 The DC SPICE model parameter extraction algorithm for the Schottky diode

6. 결과 및 고찰

제안된 방법의 타당성을 확인하기 위해 BAT54T와 FSV1045 시료에 대해 인가된 전압에 대한 전류를 측정하고 측정된 값과 계산치를 비교한다. 전류-전압 곡선에서 실선은 전류의 측정치를 나타내고 점선은 본 논문에서 제안한 SPICE 파라미터를 이용하여 계산된 전류 값이다. 측정된 전류 값의 비교는 내부저항의 온도변화를 고려하지 않은 식 (2.a)와 식 (2.c)의 결과와 내부저항의 온도변화를 고려한 식 (3.a)와 식 (3.d)의 결과에 대해 진행한다.

6.1 내부저항의 온도 변화를 고려하지 않은 계산 결과

내부저항과 I_{Kf} 의 온도 변화를 고려하지 않은 식 (2.a)를 이용하였고, 그림 6의 과정을 거쳐 해석한 결과이다. 그림 7은 BAT54T의 전류-전압 관계를 나타낸다. -25[°C] 저온 조건에서 125[°C]까지 온도 조건에서 측정하였다. 실측치와 계산치를 비교한 결과 -25[°C] 저온 조건에서 25.3%의 평균 상대오차를 보이고 있으며 125[°C] 고온 조건에서 34.6%의 평균 상대오차를 보인다.

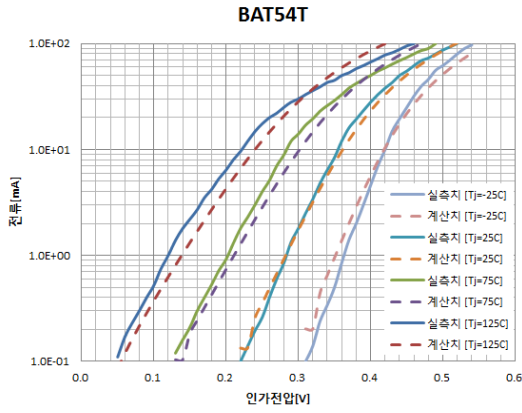


그림 7 식 (2.a)와 식 (2.c)를 이용한 BAT54T의 전류-전압 곡선
 Fig 7 The I-V curves of BAT54T using equation (2.a) and equation (2.c)

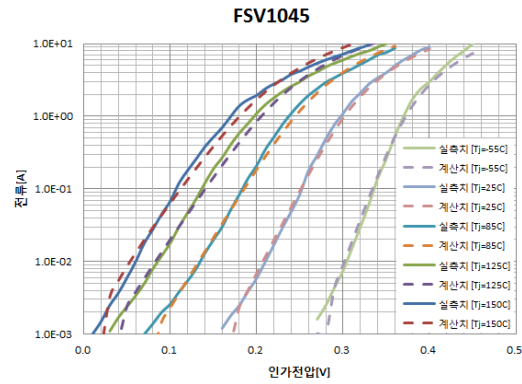


그림 8 식 (2.a)와 식 (2.c)를 이용한 FSV1045의 전류-전압곡선
 Fig 8 The I-V curves of FSV1045 using equation (2.a) and equation (2.c)

그림 8은 FSV1045의 전류-전압 관계를 나타낸다. -55[°C] 저온 조건에서 150[°C]까지 온도 조건에서 측정하였다. 실측치와 계산치를 비교한 결과 -55[°C] 저온 조건에서 25.2%의 평균 상대오차를 보이고 있으며 150[°C] 고온 조건에서 23.3%의 평균 상대오차를 보인다. 그림 7과 그림 8에서 우측 저온 곡선의 영역 3에 해당하는 영역의 계산치가 측정치에 비해 작은 결과를 나타

표 1 식 (2.a)와 식 (2.c)를 이용한 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터

Table 1 The DC SPICE model parameter for the Schottky diode using equation (2.a) and equation (2.c)

시 료	FSV1045	BAT45
IS	1.67e-7	1.03e-7
Eg	0.5	0.7
XTI	2.6	2.4
N	0.732	1.19
RS	7.85e-3	9.6e-4

내고 있으나 좌측 고온 곡선은 계산치가 실측치에 비해 큰 전류를 나타내고 있다. 온도가 증가하면 Schottky 다이오드 내부저항이 증가하나 온도가 변하여도 식 (2.c)에서 사용하는 내부저항이 상수 값으로 고정되어있기 때문에, 이로 인해 계산 값이 측정치의 전류보다 큰 값을 가짐으로써 발생하는 오차를 피할 수 없다. 표 1은 식 (2.a)와 식 (2.c)를 이용한 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델의 주요 파라미터이다.

6.2 내부저항의 온도 변화를 고려한 계산 결과

내부저항과 I_{KF} 의 온도 변화를 고려한 식 (3.a)를 이용하였고, 그림 6의 방법으로 해석을 진행한 결과이다. 그림 9는 BAT45의 전류-전압 관계를 나타낸다.

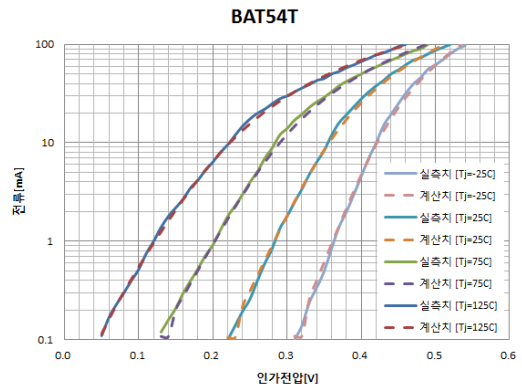


그림 9 식 (3.a)와 식 (3.d)를 이용한 BAT54T의 전류-전압 곡선
 Fig 9 The I-V curves of BAT54T using equation (3.a) and equation (3.d)

상온에서 150[°C]까지 온도 조건에서 측정하였다. 실측치와 계산치를 비교한 결과 상온에서 8.4%의 평균 상대오차를 보이고 있으며 고온 조건에서 3.8%의 평균 상대오차를 보인다. 그림 10은 FSV1045의 전류-전압 관계를 나타낸다. -55[°C] 저온 조건

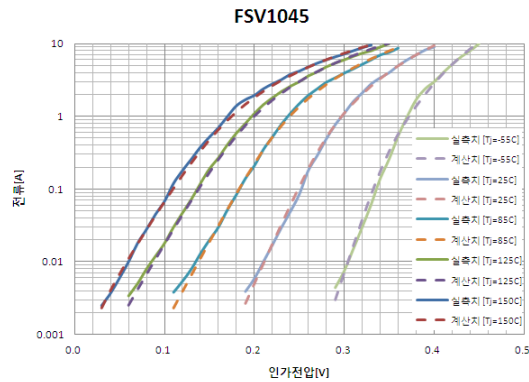


그림 10 식 (3.a)와 식 (3.d)를 이용한 FSV1045 전류-전압곡선
 Fig 10 The I-V curves of FSV1045 using equation (3.a) and equation (3.d)

에서 150[°C]까지 온도 조건에서 측정하였다. 실측치와 계산치를 비교한 결과 -55[°C] 저온 조건에서 11.3%의 평균 상대오차를 보이고 있으며 150[°C] 고온 조건에서 6.7%의 평균 상대오차를 보인다. 내부저항과 I_{KF} 의 온도 변화를 고려함으로써 그림 9와 그림 10이 그림 7과 그림 8에 비해 향상된 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 표 2는 식 (3.a)와 식 (3.d)를 이용한 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델의 주요 파라미터이다.

표 2 식 (3.a)와 식 (3.d)를 이용한 Schottky 다이오드의 DC SPICE 모델 파라미터

Table 2 The DC SPICE model parameter for the Schottky diode using equation (3.a) and equation (3.d)

시 료	FSV1045	BAT45
IS	1.643e-8	3.586e-8
EG	0.5	0.7
XTI	2.6	2.4
N	0.616	1.07
IKF	0.846	2.63e-2
TIKF	6.7e-3	-1.0e-3
RS	4.527e-3	6.6e-4
TRS1	5.568e-3	8.4e-3
TRS2	5.49e-6	1.0e-7

7. 결 론

DC 순방향 바이어스가 인가된 조건에서 Schottky 다이오드의 SPICE 모델 파라미터를 정교하게 추출할 수 있는 방법을 제안하였다. 다양한 온도조건에서 큰 전류가 흐르는 영역에서 해의 정확도를 높이기 위해 내부저항의 온도특성을 고려하였다. SPICE 파라미터를 추출하기 위해 전류의 크기에 따라 해석영역을 3개 단계로 구분하여 진행하였고 각 해석 단계 별로 SPICE 파라미터의 초기해를 계산하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 BAT45와 FSV1045 시료에 대해 DC SPICE 모델 파라미터를 추출하였다. 내부저항의 온도 변화를 고려하지 않은 경우 실측치와 계산 값을 비교한 결과 BAT45와 FSV1045 시료에 대해 각각 30%와 24.3%의 평균 상대오차를 보이고 있으나 내부저항의 온도 특성을 고려한 경우 BAT45와 FSV1045 시료에 대해 각각 6.1%와 9%의 평균 상대오차를 보이고 있으므로 제안한 방법의 타당성을 확인할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 부천대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과입니다.

References

- [1] R. S. Muller, T. I. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley & Sons, New York, pp. 174-191 2003.
- [2] MANOJ MEHROTRA and B. JAYANT BALIGA, "Trench MOS Barrier Schottky (TMBS) Rectifier: A Schottky Rectifier with Higher Than Parallel Plane Breakdown Voltage", Solid-State Electronics, Vol. 38, No. 4, pp. 801-806, 1995.
- [3] Fairchild Semiconductor, Automotive Solutions Guide, Fairchild Semiconductor, USA, 2012.
- [4] Infineon, ICE3BR0665JF: Off-line SMPS Current Mode Controller with Integrated 650V Cool MOS and Start-Up Cell (Frequency Jitter Mode) in FullPak, Infineon, Germany, 2008
- [5] Rhom, 3-Phase Motor Driver for CD-ROMs, Rohm Japan, 2001.
- [6] S.K.Cheung, N.W.Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", Appl. Phys. Lett. 49(2), 14, July 1986.
- [7] N. Arora, MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation Theory and Practice, Springer-Verlag Wien New York, New York, pp. 501-535, 1993.
- [8] Paul W. Tuinenga, SPICE A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice, pp. 126-131, Prentice Hall, 1988
- [9] Cadence Manual, PSPICE A/D Reference Guide, pp. 150-154, November 2004.

저 자 소 개



이 은 구 (Un-Gu Lee)

1995년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997년 2월 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2003년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 부천대학교 정보통신과 부교수 재직.

E-mail : leg@bc.ac.kr