

반송자-반송자 산란 이동도 모델의 구현에 관한 연구

유은상 노영준 이은구 김철성
인하대학교 전자공학과

A Study on the implementation of the Carrier-Carrier Scattering mobility model

Eun-sang Yoo Young-jun Noh Eun-gu Lee Cheol-sung Kim
Dept. of Electronics Eng., Univ. of Inha
#253 YongHyeon-Dong Nam-Ku, Incheon, Korea

요 약

본 논문에서는 다수 반송자에 의해 일어나는 산란 현상을 고려한 반송자-반송자 산란(CCS) 이동도 모델을 구현하였다.

구현된 CCS 이동도 모델을 검증하기 위해 N⁺P 접합 다이오드에 대해 모의실험 한 후 MEDICI와 비교한 결과 장벽전위인 0.9[V] 미만과 이상에서 각각 2%와 6% 정도의 상대오차를 보였다.

BJT의 컬렉터에 30[V]를 인가한 후 베이스 전압을 0.8[V]까지 증가시켜 모의실험 한 결과 베이스 전압-베이스 전류 및 베이스 전압-컬렉터 전류 특성은 각각 4.41%, 6.10%의 최대 상대오차를 보였다.

I 서 론

최근의 전력용 반도체 소자의 개발은 실험과 시뮬레이션 병행한 개발이 진행되고 있으나, SPICE를 이용한 회로 시뮬레이션을 하는 경우 온도 효과를 고려할 수 없으며, 고 전류가 유입되는 조건에서 반송자들의 산란에 의한 이동도의 왜곡 현상이 고려되지 않았기 때문에 정확한 전기적 특성을 예측하기는 불가능하다. 따라서 소자 시뮬레이터를 이용하여 반송자간 산란 및 온도 특성을 고려한 모의실험을 통해 전력용 반도체 소자의 설계가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 높은 바이어스를 인가하였을 경우 고농도의 전자와 정공이 주입되는 고 주입 조건이 되어 반송자의 산란 효과를 고려한 반송자-반송자 산란(CCS) 이동도^[1] 모델을 자체 개발된 시뮬레이터인

BANDIS에 구현하였다.

CCS 이동도 모델을 검증하기 위해 0.8[μ m]의 설계규칙으로 제작된 N⁺P 접합 다이오드의 순방향 전압-전류 특성과 전력용 소자인 이중접합 트랜지스터(BJT)의 전압-전류 특성을 MEDICI^[2]의 시뮬레이션 결과와 비교한다.

II 반송자-반송자 산란

반송자-반송자 산란은 소자 내부에서 전자와 정공이 고 농도로 분포되었을 때 반송자와 반송자에 의한 산란 현상을 고려한 이동도 모델이다. 전력 소자는 높은 인가 전압 상태에서 동작하므로 급속학적 PN 접합을 넘어서 주입되는 다수의 소수 반송자에 의한 산란 현상을 고려해야 한다.

Alder^[3]는 온도 의존성을 가진 새로운 CCS 이동도 모델을 제안하였다. Li와 Thurber^[4]는 자유 반송자 농도가 이온화된 불순물 농도와 같은 저 주입 조건에서 CCS 이동도 모델을 조사하였으나 반송자간의 산란이 상대적으로 작거나 중요하지 않은 저 주입 조건이라는 제한이 있다.

Dorkel과 Letureq^[1]은 CCS 이동도에 대하여 Alder의 모델과 구조적으로 등가인 온도 의존성을 가지는 모델을 제안하였으며, 식 [2.1]은 상용 시뮬레이터인 MEDICI에서 사용되고 있는 CCS 이동도 모델이다.

$$\mu^c = \frac{A \cdot DL \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}}{\sqrt{np} \ln \left(1 + B \cdot DL \left(\frac{T}{300}\right)^2 (np)^{-1/3}\right)} \quad [2.1]$$

여기에서, $A.DL$ 은 $1.04 \times 10^{21} \left[\frac{1}{\text{cmVs}} \right]$ 이고, $B.DL$ 은 $7.54 \times 10^{13} \left[\text{cm}^{-2} \right]$ 이다.

CCS 이동도 모델은 다수의 반송자가 주입되는 고 주입 조건에서는 주된 산란 요인이나 저 주입 조건에서 CCS 이동도는 큰 값이므로 Mathiessen 규칙에 의해 다른 이동도와 결합되어질 때 이동도의 결과에는 큰 영향을 미치지 못한다.

III 이온화된 불순물 산란을 고려한 CCS 이동도 모델

이온화된 불순물 산란 이동도는 불순물 이온의 비주기적인 배치로 인하여 주기적인 전위가 교란되어 발생하는 이동도이고, CCS 이동도는 반송자간의 영향으로 발생하는 이동도이므로 이온화된 불순물 산란 이동도와 CCS 이동도는 서로 영향이 없다.

따라서 Matheissen 규칙을 사용하여 결합할 수 있고 식 [3.1]과 같이 나타낸다.

$$\mu^{IC} = \left\{ \frac{1}{\mu^C} + \frac{1}{\mu^I} \right\}^{-1} \quad [3.1]$$

여기에서 μ^I 는 이온화된 불순물 산란 이동도이고, μ^C 는 CCS 이동도이다. 그러나, 격자 진동에 의한 산란은 온도에 따른 격자의 진동에 의해 발생되고 이온화된 불순물 원자는 격자 내에서 열적 진동을 일으키므로 격자 진동에 의한 산란과 이온화된 불순물 산란은 서로 영향을 주게 된다. 따라서 격자 산란과 이온화된 불순물 산란 및 CCS를 고려한 유효 이동도는 Debye와 Conwell에 의해 유도된 방법에 기초하여 구할 수 있고 결과 식은 식 [3.2]에 정리하였다^[5].

$$\mu_{n,p}^I = \mu_{n,p}^L (1 + x^2 \cdot (Ci(x) \cdot \cos(x) + si(x) \cdot \sin(x))) \quad [3.2]$$

여기에서,

$$x = \sqrt{\frac{6\mu_{n,p}^L}{\mu_{n,p}^C}} \quad [3.3]$$

$$Ci = - \int_x^\infty \frac{\cos(t)}{t} dt \quad [3.4]$$

$$si = - \int_x^\infty \frac{\sin(t)}{t} dt \quad [3.5]$$

이다. 식 [3.3]~[3.5]를 식 [3.2]에 대입하면 식 [3.6]과 같다.

$$\mu = \mu_{n,p}^L \left[\frac{1.025}{1 + \left[2.126 \left(\frac{\mu_{n,p}^L}{\mu_{n,p}^C} \right) \right]^{0.715}} - 0.025 \right] \quad [3.6]$$

IV 시료 제작

0.8[μm]의 설계규칙을 갖는 ASIC용 공정으로 제작된 N⁺P접합 다이오드의 불순물 농도 프로파일의 조감도는 그림 4.1과 같다.

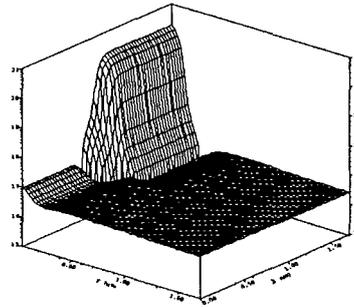


그림 4.1 N⁺P 접합 다이오드의 불순물 농도 분포의 조감도

시뮬레이션에 사용될 바이폴라 접합 트랜지스터는 정전압 IC와 같은 전력용 반도체 소자의 공정을 이용하여 제작하였다.

그림 4.2는 바이폴라 접합 트랜지스터(BJT)의 단면도이다.

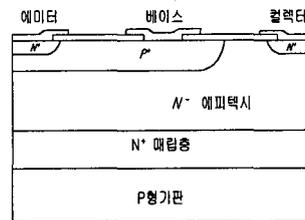


그림 4.2 바이폴라 접합 트랜지스터의 단면도

그림 4.3은 완성된 BJT의 불순물 농도 프로파일의 조감도이다.

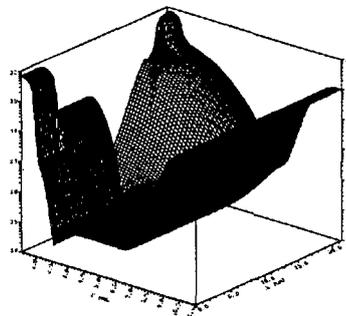


그림 4.3 BJT의 불순물 농도 분포의 조감도

V 결과 및 고찰

본 논문의 시뮬레이션 환경은 Windows NT 4.0 기 반의 Visual C++ 5.0 컴파일러를 사용하여 DEC사의 433[MHz] Personal Alpha Workstation에서 시뮬레이션을 하였고 MEDICI는 HP 9000/715 Workstation에서 수행하였다. 표 5.1은 시뮬레이션에 사용된 물리적인 모델이다.

표 5.1 시뮬레이션에 사용된 물리적 모델

물리적 현상 및 상수	사용된 모델 및 식
이동도	반송자-반송자 산란 격자 진동 산란 이온화된 불순물 산란
반송자 분포	볼츠만 통계

그림 5.1은 N⁺P 접합 다이오드의 단자에 순방향 바이어스를 인가했을 때의 입력전압 Vin에 따른 해석적인(Analytic) 이동도와 CCS 이동도의 단자전류를 비교하였다. 해석적인 이동도는 전자와 정공의 농도만을 고려한 이동도 모델이고, CCS 이동도는 고 주입 조건에서 주입된 반송자와 반송자 사이의 산란 현상을 고려한 이동도 모델이므로 해석적인 이동도를 사용하는 경우 보다 단자 전류가 감소한다. 다이오드의 양 단자에 0.7[V] 이상의 순방향 바이어스가 인가되면 고 주입 조건이 되어 반송자들의 산란 현상으로 인하여 이동도의 감소를 보이며, 단자 전류가 감소함을 알 수 있다.

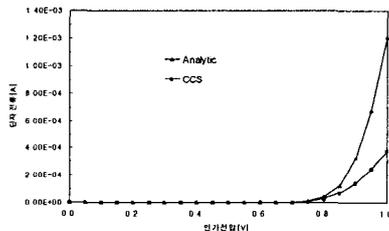


그림 5.1 해석적인 이동도와 Carrier-Carrier 산란 이동도의 전류 비교

그림 5.2는 N⁺P 접합 다이오드의 단자에 순방향 바이어스를 인가했을 때의 입력전압 Vin 대 단자전류 i 특성을 나타낸다. N⁺P 접합 다이오드의 장벽전위인 0.9[V] 미만에서는 MEDICI와 BANDIS 결과의 상대오차가 2% 이내인 반면에 외부에 인가된 바이어스가 다이오드의 장벽전위에 근접하는 경우 6%의 상대오차를 보이고 있다.

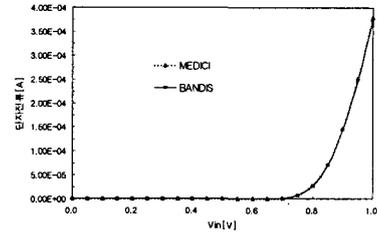


그림 5.2 순방향 바이어스에서 N⁺P 접합 다이오드의 Vin 대비 i 특성

그림 5.3과 그림 5.4는 N⁺P 접합 다이오드의 단자에 순방향 바이어스를 인가했을 때의 입력전압 Vin에 따른 전자의 이동도와 정공의 이동도를 나타낸 것으로 바이어스의 입력이 0.7[V] 이상 인가되면 고 농도의 전자와 정공이 주입되는 고 주입 상태가 되어 주입된 반송자들의 산란 영향으로 인하여 이동도가 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다.

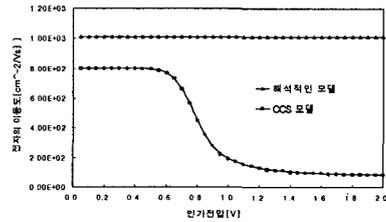


그림 5.3 인가 전압에 따른 전자의 이동도

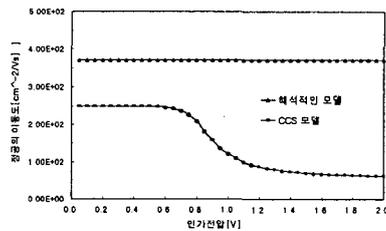


그림 5.4 인가 전압에 따른 정공의 이동도

그림 5.5는 순방향 활성 영역에서 동작하는 BJT 컬렉터 단자에 5[V]를 인가한 상태에서 베이스 전압 V_{be}에 따른 베이스 전류의 특성과 컬렉터 전류의 특성을 나타내었으며, 베이스 전압-베이스 전류의 평균 상대오차 3.1%이고 베이스 전압-컬렉터 전류의 평균 상대오차는 5.4%를 보이고 있다.

그림 5.6은 BJT의 컬렉터 전압이 5[V]일 때 BANDIS와 MEDICI의 수렴특성을 나타내었다.

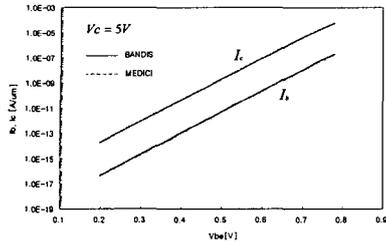


그림 5.5 $V_c=5[V]$ 일 때 BJT의 베이스 전압-베이스 전류 및 컬렉터 전류

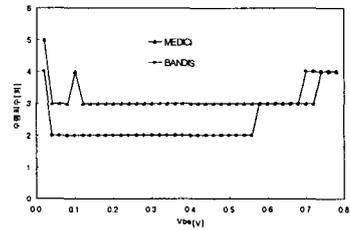


그림 5.8 $V_c=30[V]$ 일 때 BJT의 수렴 특성의 비교

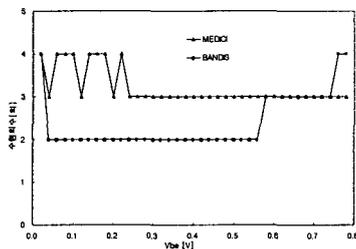


그림 5.6 $V_c=5[V]$ 일 때 BJT의 수렴 특성의 비교

그림 5.7은 Slotboom 변수의 한계 전압 이상의 바이어스인 30[V]를 인가하였을 때의 베이스 전압에 따른 베이스 전류의 특성과 컬렉터 전류의 특성을 나타내었으며, 베이스 전압-베이스 전류의 평균 상대오차는 4.49%이고 베이스 전압-컬렉터 전류의 평균 상대오차는 6.10%이다.

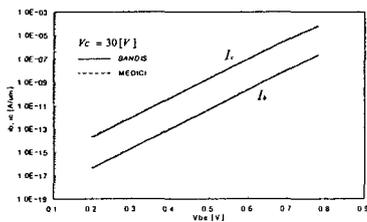


그림 5.7 $V_c=30[V]$ 일 때 BJT의 베이스 전압-베이스 전류 및 컬렉터 전류

그림 5.8은 컬렉터에 30[V]의 바이어스를 인가하였을 때 BJT의 수렴특성을 나타내었다.

VI 결론

전력용 반도체 소자의 해석을 위해 고 농도의 전자와 정공이 주입되는 경우에 반송자-반송자 산란(CCS) 현상을 고려한 이동도 모델을 구현하였고 수렴특성을 향상시키기 위해 Slotboom 변수를 사용하였다.

N⁺P 접합 다이오드의 순방향 전압-전류 특성은 MEDICI의 시뮬레이션 결과와 다이오드의 장벽전위인 0.9[V] 미만에서는 상대오차가 2% 이내인 반면에 외부에 인가된 바이어스가 다이오드의 장벽전위에 근접하는 경우에는 약 6%의 상대오차를 보이고 있다.

정전압 IC 공정용으로 제작된 전력용 BJT의 베이스 전압-베이스 전류 및 베이스 전압-컬렉터 전류의 전기적인 특성은 각각 MEDICI와 3.1%, 5.4%의 최대 상대오차를 보였다. Slotboom 변수의 한계 전압 이상의 바이어스인 30[V]를 인가하였을 경우 베이스 전압-베이스 전류 및 베이스 전압-컬렉터 전류의 전기적인 특성은 각각 MEDICI와 4.41%, 6.10%의 최대 상대오차를 보였다.

참고 문헌

- [1] Harvey Brooks, "Scattering by Ionized Impurities in Semiconductors," *Physical Review* Vol 83, p879, 1951.
- [2] TMA, *MEDICI manual*, Technology Modeling Association, Inc., 1993.
- [3] Adder. M. S, "Accurate Calculation of the Forward Drop and Power Dissipation in Thyristors," *IEEE Trans. on Electron Device*-15, No 1, pp. 16-22, 1978.
- [4] Li, S. S Thurber, W.R, "The Dopant Density and Temperature Dependence of Electron Mobility and Resistivity in n-type silicon," *Solid-state electronics*, Vol 20, pp, 609-616, 1977.
- [5] E. Conwell and F. Weisskopf, "Theory of Impurity Scattering in Semiconductors," *Physical Review*, Vol 77, No 3. pp. 388-390, 1950.