

# 수치해석을 이용한 전력 BJT의 정특성 분석

## The analysis of the characteristics of the power BJT using numerical analysis method

李恩九, 尹顯民, 金鐵城

(Eun Gu Lee , Hyun Min Yun and Cheol Seong Kim)

### 요 약

수치해석을 이용하여 전력 BJT의 정특성을 분석하는 방법을 제안한다. 고농도의 불순물이 주입된 영역에서 반송자 농도를 정교하게 구하기 위해 Fermi-Dirac 통계를 고려하며, 베이스 영역에서 재결합 전류를 계산하기 위해 Philips Unified 이동도 모델과 SRH 및 Auger 생성-재결합 모델을 사용한다. 제안된 방법을 검증하기 위해 현재 산업체에서 사용중인 전력 BJT의 베이스 전류를 1.0[ $\mu\text{A}$ ]에서부터 3.5[ $\mu\text{A}$ ]까지 0.5[ $\mu\text{A}$ ] 단위로 증가시키면서 컬렉터 전류의 실측치와 BANDIS와 비교한 결과 8.9%이내의 상대오차를 보였다.

### Abstract

An algorithm for analyzing the characteristics of the power BJT using numerical analysis method is proposed. The Fermi-Dirac statistics is used to calculate the carrier concentration in highly doped region. Philips Unified mobility model, SRH model and Auger model is used to calculate the recombination current of base region. To verify the accuracy of the proposed method, the collector current of BANDIS is compared with the measured data in the condition of the base current increased from 1.0[ $\mu\text{A}$ ] to 3.5[ $\mu\text{A}$ ] The collector current of BANDIS show a maximum relative error within 8.9% compared with the measured data .

*Keyword : Fermi-Dirac, Fermi, Boltzmann, BJT, BANDIS,*

### I. 서 론

컴퓨터의 하드디스크나 플로피 디스크 혹은 CD-ROM, VCR, CPU에 부착된 Fan등의 각종 모터들 제어하기 위한 구동 드라이버 IC는 안정된 동작 특성이 요구되며 이들의 제어가 용이해야 한다.

이러한 모터 구동 드라이버 IC에는 전력 BJT가 널리 사용되고 있으나 점차 높은 rpm을 유지하기 위해 고 출력 동작이 요구되고 있으며 인가 바이어스에 따라 동작이 안정될 수 있도록 소자의 설계 문제가 대두되고 있는 추세이다.

전력 BJT의 이득은 에미터 영역의 면적에 비례하므로 쉽게 제어할 수 있는 장점이 있어 업계에서 모터 구동 드라이버 IC 및 정 전압 regulator를 설계에 있어서 전력 BJT를 선호하고 있다. 이러한 추세에 맞추어 집적회로에 사용되는 전력 BJT를 제작하기 위해

仁荷大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Engineering, Inha Univ.)

接受日:2002年7月30日, 修正完了日:2002年11月29日

다양한 공정개발과 소자개발이 진행되고 있으나 실험에만 의존하는 경우 많은 개발비용과 시간이 요구되는 단점이 있어 현재에는 모의 실험과 병행하여 공정 개발 및 소자 개발이 진행되고 있는 추세이다.

전력 소자의 해석이 가능한 기존의 소자 시뮬레이터로는 2차원 소자 시뮬레이터인 BIPOLE[1], ATLAS[2], MEDICI[3] 등이 있으나 BIPOLE의 경우 경험적인 모델과 해석적인 모델을 혼합한 시뮬레이터로 소자의 정특성을 분석하는 데에 부적합하며 ATLAS와 MEDICI의 경우는 CMOS 소자에 최적화 되어 있어 BJT를 해석하기 위해서는 여러 가지 기능들이 첨가되어야 한다. 또한 베이스와 에미터 영역에 고농도의 불순물을 포함하는 BJT를 모의실험하기 위해서는 Fermi-Dirac 통계를 고려해야하나, 전위와 전자 및 정공 농도를 변수로 사용하기 때문에 내부 전위는 반송자를 포함한 다차원 함수[3]로 표현된다. Boltzmann 통계를 사용할 경우 반송자는 전위와 지수함수관계를 가지므로 간단한 계산과정을 거쳐 구할 수 있으나, Fermi-Dirac 통계를 사용할 경우 고농도의 반송자가 존재하는 영역에서 다차원의 방정식을 해석해야 하므로 계산량이 증가하고 해의 수렴특성이 악화된다.

그 밖에 3차원 소자 시뮬레이터로는 DAVINCI[4]가 있으나 소자를 포함하는 회로 모의실험시 주 메모리 용량의 부족으로 sparse LU법을 사용할 수 없으며 메모리 소비량을 감소시키기 위해 ILUCGS법[5]으로 회로를 해석하는 경우 방대한 양의 계산 시간을 필요[6]로 하므로 소자 시뮬레이터로는 부적합한 실정이다.

본 논문에서는 수치해석 기법을 이용하여 전력 BJT의 전기적인 특성을 정교하게 예측할 수 있는 해석 방법을 제시한다. 고 농도로 불순물이 주입된 영역에서 전위 분포와 반송자 농도 및 단자 전류를 정확히 예측하기 위해 Slotboom 변수법을 근간으로 반송자의 농도를 정교하게 계산하는 방법과 Fermi-Dirac 통계를 고려하여 반도체 방정식을 이산화하는 방법을 제안하고 Fermi-Dirac 통계를 따르는 반송자의 초기 해 설정 알고리즘을 제안한다. 또한 Philips Unified 이동도 모델을 수치적으로 구현하였고 생성-재결합 현상을 효과적으로 고려할 수 있도록 SRH[7] 및 Auger[8] 생성-재결합 모델을 구현하였다. 제안된 방법은 정교

한 데이터 구조와 강화된 입출력 기능을 갖는 전진해법으로 3차원 소자모의실험이 가능한 BANDIS[9]에 구현되었다.

제안된 방법을 검증하기 위해 전력 BJT에 대해 모의 실험하였고 상용화된 전력 NPN BJT의 실측치와 비교 검토하였다.

본 논문의 II장에서는 전력 BJT의 정특성 해석에 필요한 물리적인 모델을 설명하고 III장에서는 전력 BJT의 제작과정을 보이고 있으며 모의실험 결과를 측정치와 비교 분석한다.

## II. 전력 BJT의 정특성 분석

전력 BJT의 정특성을 해석하기 위해서는 소자 내부의 전위 분포와 반송자의 농도, 인가 바이어스에 따른 단자 전류-전압 특성을 정교하게 예측할 수 있어야 한다. 식 (1)은 반도체의 전기적인 특성을 예측하는데 사용되는 반도체 방정식이며 각각 식(1a)는 소자 내부의 전위분포를 나타내는 포아송 방정식이고, 식(1b)와 식(1c)는 각각 전자 연속방정식과 정공 연속 방정식이며 식(1d)와 식(1e)는 전류밀도방정식이다[9].

$$\nabla(\epsilon_r \nabla u) + \frac{1}{L_D^2} [\gamma_p e^{-u+V_p} w - \gamma_n e^{u+V_n} v + C] = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \bar{J}_n - U = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (1b)$$

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot \bar{J}_p + U = -\frac{\partial p}{\partial t} \quad (1c)$$

$$\bar{J}_n = kT \mu_n \gamma_n e^{u+V_n} \nabla v \quad (1d)$$

$$\bar{J}_p = -kT \mu_p \gamma_p e^{-u+V_p} \nabla w \quad (1e)$$

식(1)은 프로그램의 편의를 위해 정규화[9]되었다. 전력 BJT의 동작특성은 에미터와 베이스 영역에서 해의 정확도에 많은 영향을 받는다. 특히 고농도의 불순물이 주입된 영역에서는 전도대와 가전자대의 에너지 준위와 페르미 에너지 준위의 차이가 열전위의 3배 이하로 감소하므로 반송자 농도를 정교하게 구하기 위해 Fermi-Dirac 통계를 사용해야 한다. 또한 다수의

반송자가 에미터에서 베이스로 주입되어 반송자간 산란이 발생하면 이동도가 왜곡되어 전류가 감소하므로 이러한 효과를 고려하기 위해 Philips Unified이동도 모델을 사용해야 하며 베이스전류에 많은 영향을 주는 반송자간 재결합 현상을 고려해야 한다.

**2.1 Fermi-Dirac 통계**

BJT의 에미터 영역이나 베이스 영역에 주입된 불순물의 농도가  $N_D > 0.1 N_C$  또는  $N_A > 0.1 N_d$ 인 경우 열 평형상태에서 페르미 준위는 N형 반도체 영역에서 전도대 근처에 존재하고 P형 반도체 영역에서 가전자대 근처에 존재하므로 볼츠만 통계를 사용한 반송자 농도의 근사는 더 이상 유효하지 않다. 특히 저온에서 불순물의 freeze out 으로 불완전 이온화 현상이 발생하는 경우에 오차를 최소화 하기 위해서는 Fermi-Dirac 통계를 이용해야 한다. 식 (2)는 정상상태에서 전자 및 정공 의사페르미 준위를 이용하여  $\eta_n$  과  $\eta_p$  에 대해 정의한다.

$$\eta_n = \frac{E_g}{2} - V_n - u_n + u \quad (2a)$$

$$\eta_p = \frac{E_g}{2} - V_n + u_p - u \quad (2b)$$

여기서  $E_g$ 는 에너지 갭이고  $V_n$ 은 Band-gap narrowing 효과이다.

전자 및 정공 농도를 Fermi-Dirac 함수를 이용하여 나타내면 식 (3)이다.

$$n = N_c F_{1/2}(\eta_n) \quad (3a)$$

$$p = N_v F_{1/2}(\eta_p) \quad (3b)$$

여기서  $F_{1/2}(\epsilon_F) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\epsilon} d\epsilon}{1 + \exp[\epsilon - \epsilon_F]}$  이다

Boltzmann 통계를 따르는 전자 및 정공 농도는  $\eta_n$  과  $\eta_p$  에 대해 닫힌 형태의 수식이 제공되는 반면 Fermi-Dirac 통계를 근간으로 하는 반송자의 농도는

식 2와 같이 적분식의 형태로 주어지나 적분구간이 무한대이므로 근사적으로 해를 구하기 위해서는 많은 계산시간이 필요하다. Fermi-Dirac 함수를 근사화하는 방법으로 Blackmore[10]는 근사와 Joyce-Dixon[11] 근사가 알려져 있다.

Blackmore 근사 전위와 페르미 준위를 여러개의 영역으로 나누어 영역별로 근사화하는 방법으로 근사화를 수행하기 위한 계산량이 적고 영역 내에서 오차가 0.3% 미만으로 정교한 반면 두 개의 영역이 만나는 지점에서 전위와 페르미 준위에 대한 반송자 농도의 미분값이 불일치하는 단점이 있다.

Joyce-Dixon 근사는 역 Fermi-Dirac 함수를 수치적으로 근사화하는 방법이다. 전위와 페르미 준위에 대한 미분값이 연속적이지만  $\eta_n$  과  $\eta_p$  이 주어진 경우 전자 및 정공 농도를 구하기위해 Newton-Raphson 반복법을 사용해야하므로 계산량이 증가하는 단점이 있다. 그림 1은 Joyce-Dixon 근사를 이용한 경우 반송자 농도와 페르미 준위의 관계를 나타낸다.

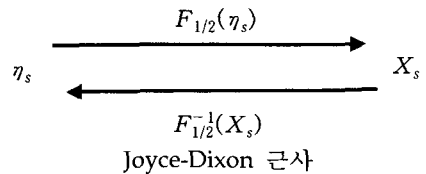


그림 1. 반송자 농도와 페르미 준위의 관계  
Fig. 1. The relation between carrier concentrations and Fermi levels

그림 1에서  $\eta_s$  는  $\eta_n$  과  $\eta_p$  이고  $X_s$  는  $n/N_c$  과  $p/N_v$  이다. 본 논문에서는 Fermi-Dirac 통계함수의 오차를 최소화하고 해석영역에서 전위에 대해 반송자의 미분이 가능하도록 Joyce-Dixon 근사를 사용하며 Joyce-Dixon 근사의 초기해를 구하기 위해 Blackmore 근사를 확장한다.

본 논문에서 제시한 확장된 Blackmore 근사는  $\eta_s$  를 크게 3개의 영역으로 나눈 후 높은 정확도를 요구하는 영역을 추가적으로 분할하여 각각의 세부 구간에 맞는 근사적인 함수를 사용하는 방법이다. 각 영역

마다 정의된 근사 함수는 식 (4)와 같다.

$$(4) \quad \begin{cases} \eta_s < -10 & F_{1/2}(\eta_s) \approx e^{\eta_s} \\ -10 \leq \eta_s < 5 & F_{1/2}(\eta_s) \approx e^{(a+b\eta_s+c\eta_s^2)} \\ 5 \leq \eta_s & F_{1/2}(\eta_s) \approx \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \left( \eta_s^2 + \frac{\pi^2}{6} \right)^{3/4} \end{cases}$$

$\eta_s$  가 -10보다 작은 저 농도 영역은 볼츠만 근사가 여전히 유효함을 나타낸다. -10과 5사이의 영역은 4개의 세부 구간으로 나누어 근사화 하였다. 계수 a, b와 c는 구간에 따라 2nd order discrete least-squares 근사법[12]을 이용하여 지수 근사화한 결과이고 표 1에 제시한다.

표 1. 구간  $\eta_s$  에 따른 계수 값

Table 1. The coefficient values according to step  $\eta_s$

구간	계수 a	계수 b	계수 c
$-10 \leq \eta_s < -6$	-8.0001185892	0.9997851195	-8.1805692267e-5
$-6 \leq \eta_s < -2$	-4.0064323910	0.9888110325	-4.2052792138e-3
$-2 \leq \eta_s < 2$	-0.2676870175	0.7709242036	-5.9024004529e-2
$2 \leq \eta_s < 5$	1.8739534260	0.3509595176	-3.3492254749e-2

그림 2는 전위와 전자 및 정공 페르미 준위가 주어졌을 때 전자 및 정공 농도를 구하기 위한 흐름도이다. 조건 단계에서는 주어진  $\eta_n$  과  $\eta_p$  로부터 확장된 Blackmore 근사를 이용하여 전자 및 정공 농도의 초기해를 설정한다. 초기해 설정단계에서 각 노드별로 Joyce-Dixon 근사를 이용하여 수치해석한 후 반송자 농도와 미분항을 구한다. 방정식 단계의 결과로부터 해의 수렴여부를 판단한 후 반송자의 농도와 농도의 미분항을 구한다.

Joyce-Dixon 근사식은 수치해석 방법을 사용해야 하므로 계산시간을 줄이기 위해서는 참값에 근접한 초기해를 설정해야 한다. 본 논문에서 제시한 확장된 Blackmore 근사 방법은 해석영역을 4개의 세부영역으

로 나누었기 때문에 참값에 비해 0.3% 이내의 오차를 보이고 있어 2회 이내의 반복연산으로 해를 구할 수 있다.

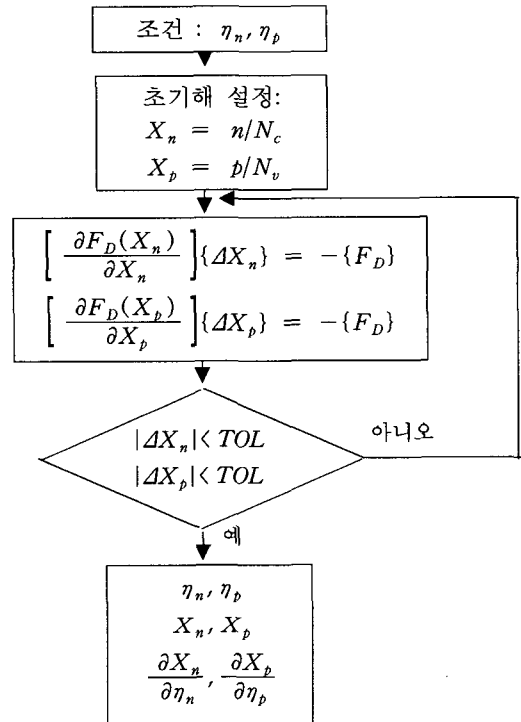


그림 2. 반송자 농도를 구하기 위한 흐름도  
Fig. 2. Flowchart for the calculation of carrier concentrations

2.2 베이스 영역에서 이동도 모델과 생성-재결합 모델

Philips Unified 이동도 모델은 엑셀터 및 도너 산란과 반송자-반송자 산란, Screening 효과를 동시에 고려할 수 있어 고 농도의 불순물이 주입된 에미터와 베이스영역을 갖는 BJT 소자를 모의실험 하는데 적합하다. 식 (5)는 전자 및 정공의 Philips Unified 이동도 모델이다.[4]

$$\mu_n = \frac{\mu_{latt,n} \cdot \mu_{D+A+p}}{\mu_{latt,n} + \mu_{D+A+p}} \quad (5a)$$

$$\mu_p = \frac{\mu_{latt,p} \cdot \mu_{D+A+n}}{\mu_{latt,p} + \mu_{D+A+n}} \quad (5b)$$

Shockley-Read-Hall은 반도체의 벌크 영역 내부에 존재하는 포획에 의해 발생하는 반송자의 생성-재결합 현상을 고려한다. 이 모델은 저 주입조건에서 동작하는 PN 접합 다이오드 혹은 BJT의 단자전류를 예측할 때 사용된다.

Auger는 BJT의 에미터 영역과 같은 고농도의 불순물이 도핑된 영역 내에서 전도대에서 가전자대로 이동하는 과잉 반송자 사이의 직접적인 재결합 현상을 고려한다. 이 모델은 고 주입조건에서 동작하는 PN 접합 다이오드 혹은 BJT의 단자전류를 예측할 때 사용된다 식 (6)과 식 (7)은 각각 Fermi-Dirac 통계를 고려한 Shockley-Read-Hall 생성-재결합 모델과 Auger 재결합 모델[4]이다.

$$U_{SRH} = \frac{\gamma_n \gamma_p e^{-u_n + u_p + V_n + V_p} e^{-V_n + V_p}}{\tau_p (\gamma_n e^{u_n - u_p + V_n + V_p} + e^{V_n + V_p}) + \tau_n (\gamma_p e^{-u_n + u_p + V_n + V_p} + e^{V_n - V_p})} \quad (6)$$

$$U_{Auger} = \Gamma_n n_i^2 v e^u (\gamma_n^2 \gamma_p v w e^{2V_n + V_p} - \gamma_n e^{V_n}) + \Gamma_p n_i^2 w e^{-u} (\gamma_n \gamma_p^2 v w e^{V_n + 2V_p} - \gamma_p e^{V_p}) \quad (7)$$

여기서  $\tau_n$  과  $\tau_p$  는 반송자의 lifetime이고  $\Gamma_n$  과  $\Gamma_p$  는 전자 및 정공의 Auger 상수이다.

### III. 결과 및 고찰

제안된 방법은 자체 개발된 소자 시뮬레이터인 BANDIS에 구현되었다. BANDIS에서 행렬풀이법으로 사용하는 전진해법은 요소단위로 행렬을 구성해 나가며 소거되는 절점이 이웃한 절점에만 영향을 준다는 원리를 이용하여 이후 요소들에서 더 이상 나타나지 않는 절점은 미리 소거함으로써 행렬의 크기를 줄여 나가는 방법이다[9]. 소거된 절점의 정보는 메모리나 하드 디스크에 저장되어 모든 요소에 대해 행렬의 조립 및 소거가 끝난 뒤 역순으로 읽으며 해를 계산하게 된다[13]. TSUPREM-4를 사용하여 모의실험용 전력 BJT 소자를 제작하였고 MEDICI의 결과 및 실측치와 비교하였다. BANDIS의 모의실험은 Windows NT4.0을 운영체제로 갖는 433 [MHz] DEC Alpha

Workstation에서 수행되었고, MEDICI는 HP Unix를 운영체제로 갖는 HP 9000/715 Workstation에서 수행되었다.

P형 기판 위에 안티몬(Sb) 이온을 주입하고 1000℃에서 30분간 확산과정을 거쳐 매립층을 형성한 후에 컬렉터 영역으로 사용되는 에피택셜층을 1050℃에서 420분 동안 6.5[μm]를 성장시켰다.

베이스 영역은 도즈량  $2 \times 10^{14}$  [cm<sup>-2</sup>], 이온주입 에너지 120keV로 BF<sub>2</sub>를 이온주입하고 에미터 영역은 도즈량  $2 \times 10^{14}$  [cm<sup>-2</sup>], 에너지 120keV로 인(P)을 이온 주입한 후에 1000℃에서 120분 동안 열처리를 진행하여 에미터 접합 깊이 0.89[μm], 베이스 접합 깊이 1.5[μm]를 얻었으며 비저항 3.0[Ω-cm]이고 에피영역의 두께는 9.0[μm]이다. 실험에 사용된 전력소자의 구조와 농도 프로파일은 각각 그림 3과 그림 4이다.

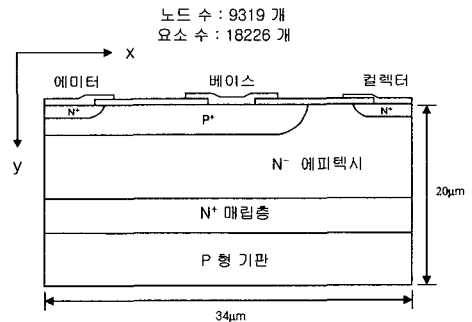


그림 3. 전력 BJT 소자의 구조  
Fig. 3. The structure of power BJT

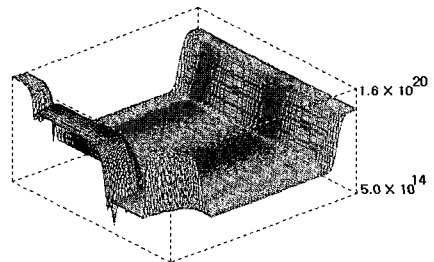


그림 4. 전력 BJT의 조감도  
Fig. 4. The Bird's view of power BJT

**3.1 Fermi-Dirac 통계 및 Philips Unified 이동도 모델의 검증**

그림 5는 Fermi-Dirac 통계를 고려한 경우 MEDICI와 비교한 결과이다. 베이스 전류를 1.0[ $\mu$ A]로 유지한 상태에서 컬렉터 전압에 대한 컬렉터 전류를 MEDICI와 비교한 결과 최대 2.4%의 상대오차를 보인다. 소자 내부의 전자 및 정공의 전계는 전도대와 가전자대의 공간적인 기울기로 정의된다. MEDICI는 고농도의 불순물이 주입된 에미터 영역에서 반송자의 농도를 정교하게 구하기 위해 Fermi-Dirac 분포를 고려하나 반송자의 농도를 변수로 가정하기 때문에 전도대와 가전자대를 구하기 위한 수식이 복잡하다. 또한 전자 및 정공 의사페르미 준위가 금속학적 접합 영역에서 불연속하는 특성을 피하기 위해 전자 및 정공 전류밀도 방정식의 확산계수를 불순물 농도와 반송자의 다차원 함수로 계산[3]하므로 전자 및 정공 연속방정식의 이산화 수식이 복잡해지고 수렴특성이 악화된다. 그러나 Slotboom 변수를 근간으로하는 BANDIS는 전자 및 정공 의사페르미 준위로부터 반송자의 농도를 구하므로 Fermi-Dirac 분포를 고려하여 반송자 농도를 구하기 위한 수식이 간단하고 반송자 농도로부터 전자 및 정공 의사페르미 준위를 유도할 필요가 없으므로 확산계수를 구하기 위한 추가적인 수식이 필요 없어 전자 및 정공 전류밀도 방정식이 단순한 수식으로 이산화 되므로 높은 전위 인가조건에서 MEDICI에 비해 우수한 수렴특성을 유지할 수 있다.

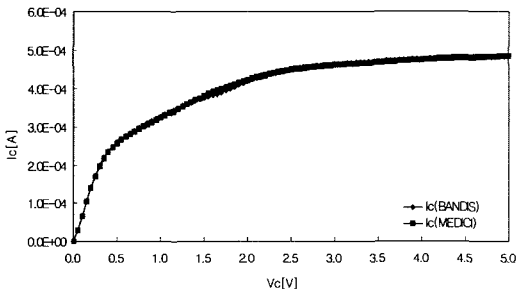


그림 5. Fermi-Dirac 통계를 고려한 경우 컬렉터 전압에 대한 컬렉터 전류  
Fig. 5. Vc-Ic using Fermi-Dirac statistics

그림 6은 Philips Unified 이동도 모델을 고려한 경

우 MEDICI와 비교한 결과이다. 컬렉터 전압을 3 [V]로 고정시킨 상태에서 베이스 전압에 대한 컬렉터 전류를 MEDICI와 비교한 결과, 베이스 전압이 낮은 잠음영역에서는 많은 오차를 보인 반면 0.3[V]이상 전압이 인가된 영역에서는 최대 2.8%이내의 상대오차를 보인다.

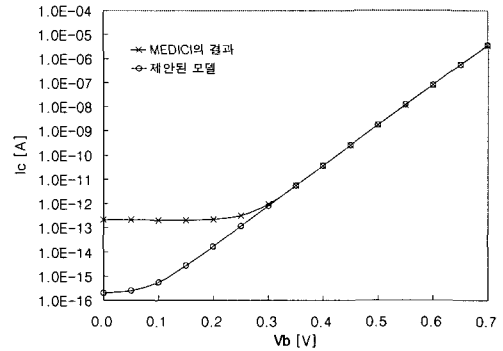


그림 6. MEDICI와 BANDIS의 컬렉터 전압에 대한 컬렉터 전류 비교  
Fig. 6. Comparison of Vb-Ic between BANDIS and MEDICI

**3.2 전력 BJT의 정특성 분석**

전력 BJT 소자를 해석하기 위해서 고농도의 불순물이 주입된 에미터와 베이스 영역에서 반송자의 농도 및 전류밀도 방정식을 정교하게 유도해야 한다. 표 2는 전력 BJT 소자를 해석하기 위해 필요한 물리적인 모델이다.

표 2. 전력 BJT 소자의 모의실험에 사용되어진 물리적인 모델

Table 2. Physical models for device simulation of power BJT

물리적인 현상	사용되어진 모델
이동도	Philips Unified 이동도
고농도 효과	에너지 갭 협폭 효과
반송자 분포	Fermi-Dirac 통계
생성-재결합	Shockley-Hall-Read, Auger

그림 7은 베이스 전류를 2.5 [ $\mu$ A]로 고정시킨 상태에서 표 2에 제시된 모델 별로 컬렉터 전압에 대한 컬렉터 전류관계를 보인다. 고농도의 불순물이 주입된

베이스 영역에서 Fermi-Dirac 통계를 사용하여 구한 반송자 농도는 Boltzmann 통계를 사용했을 때보다 작은 값을 가지므로 베이스전류와 Gummel Number 가 감소하여 전류이득이 증가한다. 그림 7에서 Fermi-Dirac 분포를 사용하면 Boltzmann 통계를 사용했을 때보다 30.5% 전류이득이 증가한다. Philips Unified 이동도 모델을 사용하면 다수 반송자간 산란에 의해 43.1% 전류이득이 감소하고 SRH 재결합 모델과 Auger 재결합 모델을 사용하면 베이스 전류가 증가하여 53.0% 전류이득이 감소한다.

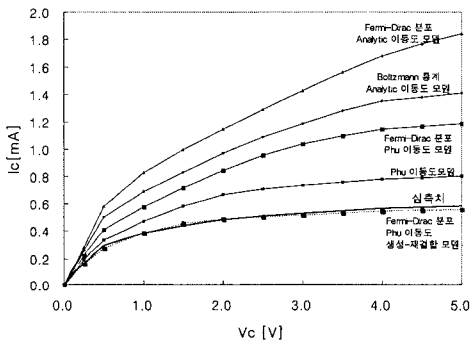


그림 7. 표 2에 사용된 모델에 따른 컬렉터 전압에 대한 컬렉터 전류  
Fig. 7.  $V_c$ - $I_c$  according to the model in table 2

그림 8은 Fermi-Dirac 통계를 고려하여 '0' 바이어스에서 포아송 방정식의 풀이 후 소자의 깊이에 따른 전위 분포를 비교하였다. 고 농도로 불순물이 주입된 에미터 영역에서 전위는 볼츠만 통계에서보다 Fermi-Dirac 통계에서 약 4% 증가하나 비교적 낮은 불순물이 주입된 영역에서는 볼츠만 통계와 Fermi-Dirac 통계를 고려했을 때 전위는 거의 변화 없음을 확인하였다.

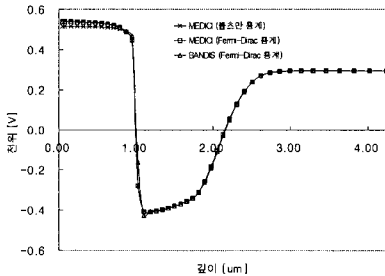


그림 8. 깊이에 따른 전위 분포  
Fig. 8 The potential profile according to depth

그림 9는 컬렉터 전극에 5.0[V]를 인가한 조건에서 베이스 전위의 증가에 따른 Gummel-Plot 이다. 컬렉터 전류는 4.1[%]의 최대 상대오차를 보이고 있으며 베이스 전류는 높은 바이어스 조건에서 6.98[%]의 상대오차를 보인다.

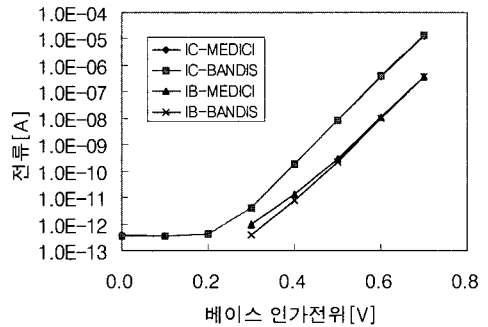


그림 9. 전력 BJT 소자의 Gummel-Plot  
Fig. 9. The Gummel-Plot of power BJT

그림 10에서는 그림 9의 모의실험 조건에 대해 MEDICI와 BANDIS의 수렴 특성을 비교한다. MEDICI는 평균 5.7회의 행렬 연산이 필요하나 BANDIS는 평균 3.7회의 행렬 연산이 필요하므로 MEDICI에 비해 BANDIS의 수렴특성이 우수함을 확인하였다.

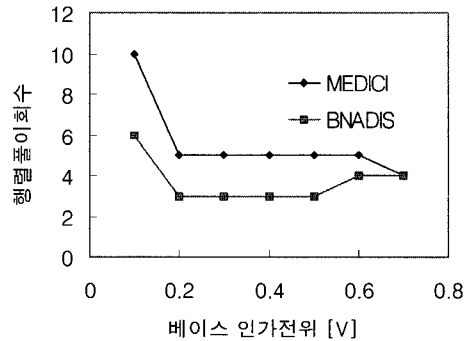


그림 10. MEDICI와 BANDIS의 수렴특성 비교  
Fig. 10. The comparison of convergence characteristic between MEDICI and BANDIS

그림 11은 현재 산업체에서 사용되고 있는 전력

BJT의 컬렉터 전압과 전류의 실측치를 BANDIS 모의 실험과 비교한 결과이다. 실측치는 베이스 전류를 1.0 [ $\mu\text{A}$ ]에서 3.5 [ $\mu\text{A}$ ]까지 0.5 [ $\mu\text{A}$ ]씩 증가시키면서 컬렉터 전류를 측정하였다. BANDIS 모의실험을 진행하기 위해 TSUPREM4를 이용하여 공정조건에 맞는 2차원 BJT 구조를 생성하였고 Fermi-Dirac 통계를 근간으로 Philips Unified 이동도 모델과 Shockley-Hall-Read 및 Auger 재결합 모델을 이용하여 측정조건과 같은 방법으로 소자 모의실험을 수행하였다.

컬렉터 전압이 낮은 영역에서는 최대 8.9%의 상대 오차를 보였고 컬렉터 전압이 비교적 높은 경우에 5%의 최대 상대오차를 보인다.

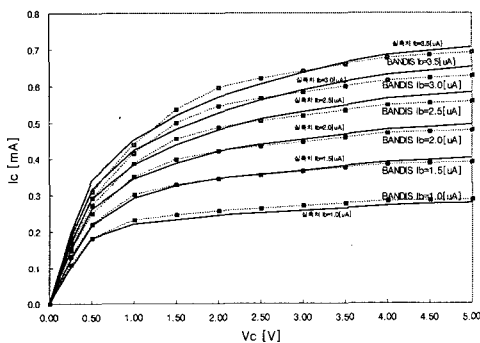


그림 11. 전력 BJT 소자의 컬렉터 전압에 대한 컬렉터 전류

Fig. 11. The  $V_c$ - $I_c$  of power BJT

전력 BJT가 포화영역에서 최대 8.9%의 상대오차를 보이는 이유는 모의실험 시간을 단축하기 위해 매립층에서 농도가 최대인 지점 이하 영역을 제거함으로써 실제 소자에 비해 컬렉터 저항이 증가했기 때문이며 이를 통해 모의실험 시간을 단축한 반면 해의 정확성을 감소시켰다.

#### IV. 결 론

수치해석을 이용하여 전력 BJT 소자의 컬렉터 전압 대 컬렉터 전류 특성을 정교하게 분석할 수 있는 해

석 방법을 제시하였다. 전력 BJT의 에미터와 베이스 영역과 같이 고 농도로 불순물이 주입된 영역에서 소자 내부 전위 분포와 전류-전압 특성을 정교하게 예측하기 위해 Fermi-Dirac 통계를 수치 해석적으로 구현하는 방법을 제시하였다. 고 농도의 반송자가 존재하는 영역에서의 지배적인 산란효과를 고려하기 위해서 Philips Unified 이동도 모델을 구현하였고 소자의 베이스 영역에서 반송자간 산란현상을 고려하기 위해 Shockley- Read-Hall 및 Auger 생성 재결합 모델을 구현하였다.

Fermi-Dirac 통계와 Philips Unified 이동도 모델을 검증하기 위해 MEDICI와 비교한 결과 각각 2.4%와 2.8%이내의 상대오차를 보였다. 현재 산업체에서 사용되고 있는 전력 BJT 소자에 대해 컬렉터 전압 대 컬렉터 전류 관계를 살펴본 결과 최대 8.9%의 상대오차를 보이고 있어 본 논문에서 제시한 해석 방법을 이용하면 전력 반도체 소자의 정특성을 비교적 정교하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] D. J. Roulston, *BIPOLE3 Users Manual*, BIPSIM Inc., 1996.
- [2] Silvaco user's manual, *ATLAS 2D-Device Simulation*, Silvaco international, 1994.
- [3] TMA, *MEDICI manual*, Technology Modeling Associates, California, 1995.
- [4] TMA, *DAVINCI manual*, Technology Modeling Associates, California, 1995.
- [5] P. Sonneveld, "CGS, A Fast Lanczos-type Solver for nonsymmetric linear systems", *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, Vol.10, No.1, pp.36-62,1989.
- [6] 김태한, *변형된 결합법을 이용한 혼합모드 소자 회로 시뮬레이터 구현에 관한 연구*, 인하대학교 대학원 박사논문, 1998.
- [7] C. T. Sah, *Fundamentals of Solid-state Electronics*,



World Scientific, pp.281-285, 1991.

- [8] R. S. Muller, T. I. Kamins, *Device Electronics for Integrated Circuits*, Wiley, pp.228-229, 1986.
- [9] 윤현민, 김태한, 김대영, 김철성, "3차원 정상상태의 드리프트-확산 방정식의 해석 프로그램 개발", 대한전자공학회 논문집 제 34권, D편, 제 8호, pp.41-51, 1997.
- [10] J. S. Blackmore "Approximations for Fermi-Dirac Integrals. Especially the Function  $F_{1/2}(\eta)$  Used to Describe Electron Density in a Semiconductor", *Solid-State Electronics*, Vol.25, No.11, pp.1067-1076, November, 1982.
- [11] W. B. Joyce and R. W. Dixon, "Analytic Approximation for the Fermi Energy of an ideal Fermi Gas", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.31, pp.354-356, 1977.
- [12] Richard L. Burden, J. Douglas Faires, *Numerical Analysis*, PWS publishing company, pp.436-444, 1993.
- [13] E. Hinton and D. R. J. Owen, *Finite Element Programming*, Academic Press, pp.171-189, 1977.

尹顯民(正會員)



1959년 7월 24일생. 1986년 2월 원광대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1988년 2월 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1988년 1월~1991년 2월 금성사 중앙연구소, LG 반도체 연구소 근무. 2002년 현재 인하대학교 전자공학과 박사과정 재학중(박사수료), 재능대학 정보통신과 부교수 재직. 주관심분야는 반도체 소자 및 VLSI 회로설계임.

金鐵城(正會員)



1938년 6월 29일생. 1975년 3월 일본 게이오대 계측공학과 졸업(박사). 1975년 4월~1979년 2월 일본 경응의속대학 연구소. 1979년~2002년 현재 인하대학교 전자공학과 교수 재직. 주관심분야는 반도체 소자 설계 및 공정개발임.

저자 소개

李恩九(正會員)



1972년 3월 20일생. 1995년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1997년 2월 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 1월~1997년 5월 현대전자 메모리 연구소 근무. 2002년 현재 인하대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중(박사수료), 부천대학 정보통신과 조교수 재직. 주관심 분야는 반도체 소자 설계 및 공정 개발임.