

Sentaurus Device simulation의 캐리어 전송 모델을 이용한 도핑 공정 설계

조철희 · 정학기 · 이재형 · 정동수 · 이종인

군산대학교 전자정보공학부

Doping process design using carrier transport model of sentaurus process

Chul-hee Cho · Hak-kee Jung · Jae-hyung Lee

Dong-soo Jung · Jong-in Lee

School of Electronic and Information Eng., Kunsan National University

E-mail: hkjung@kunsan.ac.kr

요 약

이 연구는 Sentaurus Device를 이용하여 여러 가지 캐리어 전송 모델에 대한 반도체의 구조적, 전기적, 열적 작용의 변화를 조절함으로써 공정과 설계를 보다 쉽게 개발하는데 도움이 되리라 본다. 즉, 여러 가지 캐리어 전송 모델들은 밀도구배 모델을 기반으로 확산작용과 유체역학, Monto Carlo 전송 모델로 각기 분류할 수 있다. 각각의 모델들은 필수적인 요소에 의존하여 서로 다른 형태로 나타내어 질 수 있다. 이 연구에서는 Sentaurus Device simulation을 통하여 여러 가지 형태의 캐리어 전송 모델의 변화를 시각적으로 관찰할 것이다.

I 서 론

캐리어 전송 모델은 밀도구배 모델을 기초로 확산작용, 유체역학, 몬테 카를로(Monto Carlo) 모델로 분류된다. 이 연구에서는 각각의 모델들의 따른 구조와 해석하는 방법을 알아보겠다.

확산작용(Drift-Diffusion Transport)은 확산 방정식과 푸아송 방정식을 통하여 풀이된다. 확산 작용 모델은 낮은 전류레벨인 MOSFET와 드레인 전압이 낮은 NMOS 구조에 대한 해석에 효과적이다.

유체역학적 모델(Hydrodynamic Transport)은 푸아송 방정식과 확산 방정식을 기초로 한 캐리어 온도와 열적 평형을 해석할 수 있다. 특히 이 모델은 $0.18\mu\text{m}$ 정도의 아주 미세한 깊이의 MOSFET를 시뮬레이션 하는데 유용하다. 또한 이 모델에 적용되는 것은 반도체의 블랙다운

시뮬레이션이다.

몬테 카를로(Monto Carlo)를 이용한 PFinFET 내의 표면과 채널 방위 의존 시뮬레이션은 두 개의 큰 단계로 이루어진다. 첫째는 밀도구배 시뮬레이션이고 두 번째는 밀도구배 시뮬레이션을 기본으로 Monto Carlo 전송 모델을 시뮬레이션 하는 것이다.

II 본 론

먼저 MOSFET, NMOS, PFinFET에 대해 알아보겠다. MOSFET는 4단자로 구성되며, 금속 - 산화물부분이 트랜지스터의 핵심을 이루고 있다. 게이트 산화물 양 단에는 소스와 드레인 단자로 불리는 n형 영역이 자리 잡고 있다. 소스와 드레인 사이의 영역은 채널 영역이라고 한다.

NMOS는 n채널 증가형과 공핍형 MOSFET로 분류된다. 증가형은 양의 게이트 전압이 인가되

면 전자의 반전층이 형성되어 n형 소스와 n형 드레인 영역을 연결한다. 채널이 연결되면 전류의 방향은 드레인에서 소스로 흐르게 된다. 공핍형은 게이트 전압이 인가되지 않아도 산화물 아래에 n채널이 형성된다.

PFinFET는 이중 게이트 MOSFET라고 불린다. CMOS소자는 수평적이지만 PFinFET는 수직으로 구성되어 있으므로 미세한 트랜지스터의 형성이 가능하다.

2.1 시뮬레이션 방법

Sentaurus Process 프로그램 중 SentaurusD에서 시뮬레이션 할 모델을 정한다. input command 창에서 시뮬레이션 할 모델의 파라미터 값을 입력한다. 파라미터 값을 입력한 후 시뮬레이션 된 그래프와 구조를 보기 위해서 Inspect창에서 입력된 파라미터가 저장된 파일을 호출한 후 시각적으로 확인한다.

2.2 시뮬레이션 과정

① 확산작용 (Drift-Diffusion Transport)

매우 미세한 MOSFET은 고농도 도핑 되어진 반도체와 절연체의 계면이기 때문에 채널영역 내의 캐리어 양자는 중요시 된다.

```
Physics{
  eQCvanDort
  EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
  Mobility(
    DopingDep
    eHighFieldsaturation( GradQuasiFermi )
    hHighFieldsaturation( GradQuasiFermi )
    Enormal
  )
  Recombination(
    SRH( DopingDep )
  )
}
```

EffectiveIntrinsicDensity에서 고 농도 도핑된 영역에서의 한정된 실리콘 밴드 갭을 명시한다.

Mobility 명령어에서 캐리어 모빌리티 모델을 정의한다. 또한 이 명령문은 고농도 도핑으로 인한 캐리어의 이동도 감소를 포함하며, 반도체와 절연체의 인터페이스에서의 이동도 감소, 고농도 도핑 된 영역내의 가속도, 포화역역에 대한 페르미 경사를 나타내었다.

```
Solve {
  NewCurrentFile="init"
  Coupled(Iterations=100){ Poisson }
  Coupled{ Poisson Electron }

  Quasistationary(
    InitialStep=0.01 Increment=1.35
    MinStep=1e-5 MaxStep=0.2
```

```
Goal{ Name="drain" Voltage= 1.1 }
){ Coupled{ Poisson Electron } }

NewCurrentFile=""

Quasistationary(
  InitialStep=1e-3 Increment=1.35
  MinStep=1e-5 MaxStep=1.1
  Goal{ Name="gate" Voltage= 1.1 }
){ Coupled{ Poisson Electron }
  CurrentPlot(Time=(Range=(0 1) Intervals=20))
}
```

위에 명령문에는 두 개의 Quasistationary명령어가 있는데 첫째는 드레인 전압이 0.05V로 증가하는 것이고 두 번째는 게이트 바이어스가 0V에서 1.5V로 되는 것이다.

명령문은 단지 포아송 방정식과 전자 평등 상태가 풀이되어진다. 확산 방정식은 생략한다.

② 유체역학 이동 (Hydrodynamic Transport)

이 모델에서는 NMOS 반도체의 I_dV_d 곡선도를 모의 실험하겠다.

```
Physics{
  Hydrodynamic(eTemperature)
  eQCvanDort
  EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
  Mobility(
    DopingDep
    eHighFieldsaturation( CarrierTempDrive )
    hHighFieldsaturation( GradQuasiFermi )
    Enormal
  )
  Recombination(
    SRH( DopingDep )
  )
}
```

위의 명령문은 유체역학 이동 모델을 선택하고 그에 상응하는 확산 방정식을 사용한다. 명령문 내의 eTemperature 또는 hTemperature 는 단정한 가지의 캐리어 타입 즉, 전자나 정공의 유체역학적 이동을 억제하는데 쓰여 진다. 만일 명시하지 않는다면 전자와 정공 둘 다 적용되어 진다.

eHighFieldsaturation(CarrierTempDrive)명령문은 고농도 도핑 된 영역의 캐리어 이동이 감소된 모델에 대한 캐리어 온도-의존 추진력을 나타낸다. 정공에 대해서는 생략되어지고 따라서 밀집구배 모델에 의해 묘사 되어 진다.

③ 몬테 카를로(Monte Carlo Transport)

Monte Carlo 시뮬레이션을 위해 Sentaurus SPARTA가 사용되었다.

```

MonteCarlo {
  WithSpartaSimulation
  Normal2OxideDirection = (@surface@)
  ChannelDirection = (@channel@)
  SurfScattRatio = 0.85
  CurrentErrorBar = 2.0
  MinCurrentComput = 5
  DrainContact = 2 # No. of Drain contact in
  tdr (count from 0, view with TDX)
  SelfConsistent(FrozenQF)
  Window = Rectangle[ (-0.5,-0.1)
                      (0.5, 0.1) ]
  FinalTime = 1.5e-06
  Plot { Range=(0,50e-06) intervals = 500 }
}
    
```

위의 명령문에는 PFinPET의 표면도와 채널 방향이 파라미터로 명시되어졌다. 표면의 가공되지 않은 지역은 확산 분포와 정반사적인 결합에 의해 Sentaurus SPARTA가 모델화 되어 진다. 또한 푸아송방정식이 풀이 되는 동안 고정된 파라미터를 해석한다. FinalTime은 대기상태가 도달되는데 추측되는 시뮬레이션 시간이다.

2.3 시뮬레이션 결과

각 모델에 따른 결과 그림과 그래프를 나타내었다.

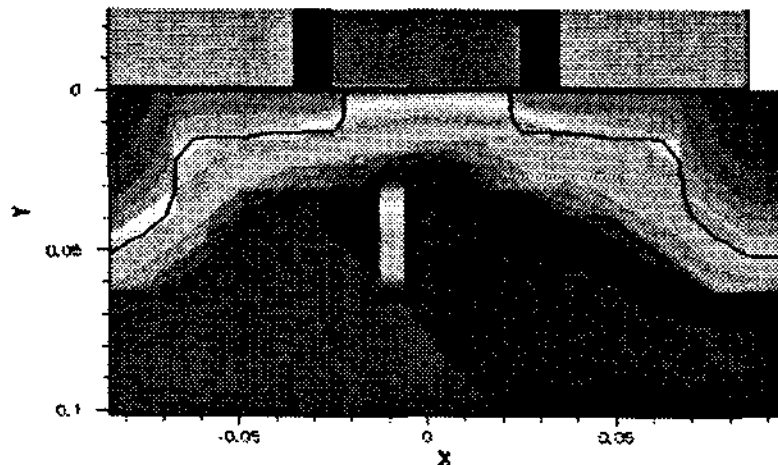


그림 1. 전자 밀집 전류 분포

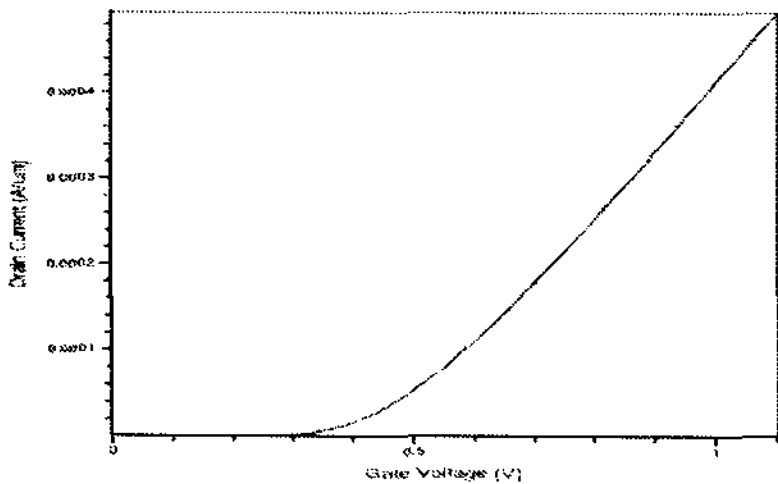


그림 2. 게이트 전압-드레인 전류

그림 1에서는 확산 작용에 의한 분포도를 도시하였고 그림 2에서는 게이트 전압 따른 드레인 전류의 변화도를 나타내었다. CurrentPlot 내의 간격을 20으로 하여 $V_{ds} = 1.1V$, $V_{gs} = 1.1V$ 에서의 전자 밀집 전류 분포와 $V_{ds} = 1.1V$ 에서의 등거리 전류-전압지점을 표시한 것이다.

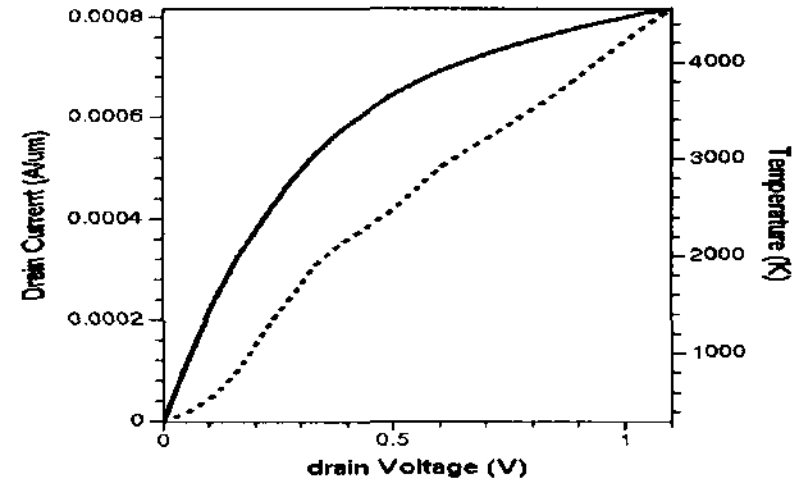


그림 3. 유체역학적 이동 모델의 드레인 전압 - 드레인 전류

그림 3는 $V_{ds} = 1.1V$ 에서 최대 전자 온도에 따른 드레인 전류의 변화를 도식한 것이다.

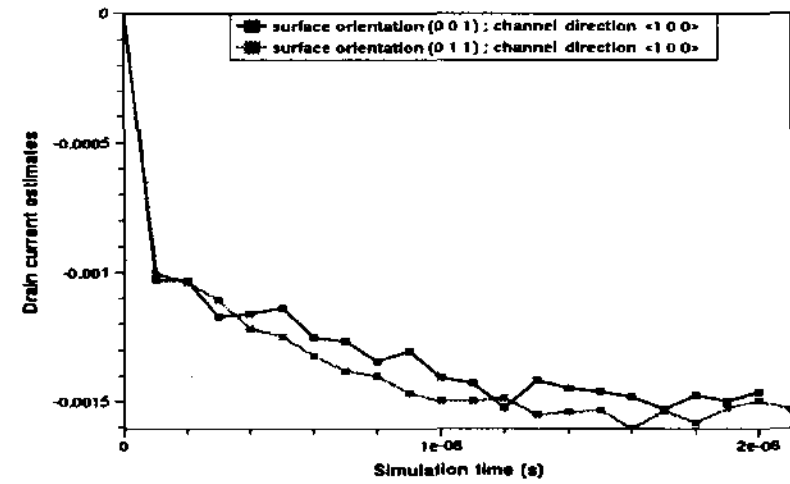


그림 4 시뮬레이션 시간에 따른 드레인 전류 예상

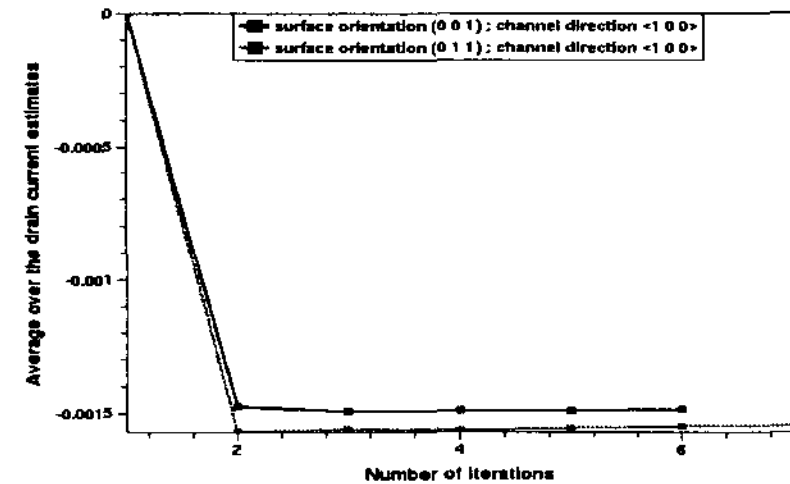


그림 5. 반복법에 따른 평균 드레인전류 예상

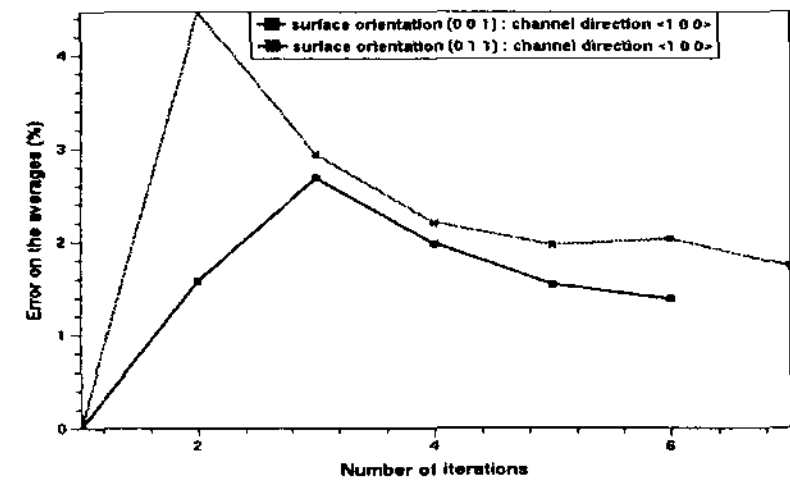


그림 6. 반복법에 따른 평균치의 에러

그림 4는 시뮬레이션 요소에 의해 두 개의 (0 0 1), (0 1 1) 으로 표면도를 정의한 것과 같은 채널 방향 <1 0 0>에 대한 드레인 지역의 예측과 정지된 상태의 전류의 평균값의 변동을 나타낸다.

그림 5은 반복법에 의한 드레인 전류의 측정치를 평균화하고, 그림 6은 반복법에 의한 평균적인 에러를 나타낸다.

III 결 론

이 연구에서 Sentaurus Device 시뮬레이션을 이용하여 밀집구배 모델을 기초로 한 여러 가지 캐리어 전송 모델에 대한 결과 및 예측을 할 수 있다. 즉, 여러 가지 요소들 온도, 확산작용, 전압의 변화, 유체역학 등을 조절함으로써 드레인 전류의 변화와 관계를 알 수 있다. 또한 반도체 내의 온도 분포와 전류 밀집을 시각적으로 확인함으로써 실제 공정 중에 발생 할 수 있는 에러를 사전에 숙지하고 대처 할 수 있으므로 보다 쉽게 반도체를 공정, 설계 할 수 있으리라 본다.

참고문헌

- [1] Sima Dimitrijevic "Semiconductor Devices", OXFORD, August 2002
- [2] Sentaurus TCAD Training manual Sentaurus Structure Editor
- [3] Donald A. Neamen "an Introduction to Semiconductor Devices", McGraw-Hill Korea, Inc, August 2006