

통합화된 반도체 공정 시뮬레이션 환경 구축에 관한 연구

이준하*, 이흥주*

*상명대학교 컴퓨터시스템공학전공 정보디스플레이연구소
e-mail: junha@smu.ac.kr

A Study of Semiconductor Process Simulation Framework

Jun-Ha Lee*, Hoong-Joo Lee*

*Information Display Research Center,
Dept. of Computer System, Sangmyung University

요 약

본 논문에서는 반도체 공정 시뮬레이션을 위해 산화, 확산 및 이온 주입 공정을 모델링하고, 효율적인 실행과 상호 연관된 연속 공정의 시뮬레이션이 가능하도록 통합화된 환경을 구축하였다. 점성적 스트레스 모델을 이용한 산화 공정은 유속-압력 알고리즘과 경계요소법을 이용하여 안정된 해를 얻었으며, 선확산과 산화증배 현상이 포함된 확산 공정은 전진해법과 유한요소법을 이용하였다. 또한 이온 주입 공정은 TRIM을 기본으로 다양한 공정 조건에 대한 모델이 추가된 몬테카를로 방법을 사용하였다. 편리한 사용자 입력 인터페이스와 그래픽적 출력을 제공하고, 윈도즈의 API함수를 이용하여 PC상에서도 적은 메모리라도 빠른 결과를 얻을 수 있도록 하였으며, 객체 지향적인 모듈화로 타 시뮬레이터와의 호환성이 가능하도록 구성하였다.

1. 서론

ULSI 및 GSI 기술 시대의 서브마이크론 트랜지스터의 특성은 다차원적인 소자 구조에 의해 큰 영향을 받고 있으며, 소자 특성에 영향을 주는 소자 격리 영역, 불순물 확산과 이온 주입 등에 의한 불순물 농도의 감소 추세, 측면 확산 및 비정상 현상 등을 다차원적으로 예측하는 것은 필수적이다[1]. 이러한 소자의 공정상에서의 특성 파악과 이를 통한 공정상의 기술 및 소자의 특성 예측은 무수한 실험적인 결과를 이용하고 있지만, 차세대 초 고집적화로 시대에서의 실험을 통한 공정상의 기술 향상은 막대한 투자 규모와 실험에 소요되는 긴 시간 등을 고려할 때 많은 제약을 받고 있다. 본 논문은 이론적인 현상이 실험적인 데이터로부터 추론되고, 현상 또는 시스템 모델이 이러한 이론으로부터 개발되어, 관찰된 현상의 이해를 제공할 뿐 아니라 아직 실험적으로 시도되지 않은 상태하의 현상을 예측할 수 있도록 반도체 산화 공정, 확산 공정 및 이온 주입

공정 시뮬레이터를 개발하였으며, 통합화하여 연속적인 공정의 시뮬레이션이 가능하도록 구축하고, 객체 지향적인 형태로 구성하여 타 시뮬레이터와의 호환성을 이루었다.

2. 단위 공정 모델

2.1. 산화 공정 모델

다차원 비평탄 실리콘 구조에서 비균일 산화층은 트렌치 또는 LOCOS 등의 소자 격리용 구조에서 매우 중요한 역할을 한다. 열산화공정의 개략적인 메커니즘은 가스 형태의 산화족이 윈도우를 통하여 기존의 산화층으로 투입, 확산되어 들어가 실리콘/산화층 계면에 도달하게 되는데 이러한 산화족 확산과정으로 인한 산화족 농도는 확산방정식의 다차원적인 풀이로서 구할 수 있다[2].

2.2. 확산 공정 모델

확산 공정의 물리적 이론은 2차 편미분 방정식

인 픽의 확산 방정식을 이용하는 연속체 이론과 결합형, 틸새형과 같은 점결함(point defects)과 불순물 원자간의 상호 작용을 포함하는 원자이론이다. 확산의 연속체 이론은 물질 전달과 열 전달 사이에 유사성에 기초를 두고 적절한 경계조건과 불순물의 확산계수를 이용하여 픽의 확산 방정식의 해를 구함으로써 확산 현상을 설명하는 것인데 불순물 확산계수는 표면 농도, 접합깊이, 농도 분포 등의 실험 자료로부터 결정된다. 실리콘에서 불순물 농도가 낮을 때 측정된 불순물 분포는 일정한 확산계수로 풀어낸 픽의 확산 방정식의 해와 잘 일치하나, 농도가 높을 때는 단순한 확산 이론으로는 충분히 설명할 수 없으며 여러 가지 다른 요소들-농도의존성 확산 효과, 점결합과 불순물의 상호작용에 의한 확산 효과, 기타 비정상적인 확산 효과 등이 고려되어야 한다[3].

2.3. 이온주입 공정 모델

이온 주입시 이온은 이온 주입기에 의해 가속되어 운동에너지를 갖게 되며, 고체 물질 속에서 가속된 운동 에너지에 의해 이온은 이온-원자 충돌 및 이온-전자와의 충돌로 인해 점차 에너지를 잃으면서 비행하게 되고 에너지를 전부 잃게 되면 고체 내의 다차원 공간 상에 정지하게 된다. 이온-원자간의 핵 충돌에 의한 산란 과정에 의해서만 진행 방향이 바뀌며 이온-전자간의 충돌 산란 과정에 의해서는 에너지 손실만이 발생하는 독립적인 두 산란 메커니즘으로 해석한다. 이온-원자간의 핵 충돌은 탄성 충돌에 의한 에너지 손실로, 이온-전자간은 비탄성 충돌에 의한 에너지 손실로 가정하며, 충돌간의 진행은 직선으로 가정한다. 그러므로 이온-원자간의 핵 충돌에 의한 이온의 핵 에너지 손실이 발생하는 핵 저지력과 이온-전자간 충돌로 인한 에너지 손실이 발생하는 전자 저지력의 합으로 에너지 손실을 계산한다[4].

3. 통합화된 시뮬레이션 환경

통합형 시뮬레이터에 필수적인 요소 중의 하나인 용이한 사용자 인터페이스의 구축을 위해 통합 시뮬레이터의 기본 조건을 설정하였다. 첫째로, 입력과 진행 상황, 출력을 그래픽 처리함으로써 사용자가 보다 쉽게 이해할 수 있도록 하였다. 이를 위해 통합 시뮬레이터가 구동하는 환경을 윈도우 호환으로 하여 PC에서만뿐만 아니라 워크스테이션에서도 동일

한 사용자 인터페이스를 제공하도록 하며 다양한 그래픽 자원을 사용하였다. 둘째로, 대화 상자식의 입력 인터페이스를 제공하였다. 이는 사용자가 새로운 포스트 스크립트 언어를 연구하지 않아도 될 뿐만 아니라 입력시의 오류를 최소화하여 올바른 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 셋째로, 시뮬레이션 진행 상황을 각 공정 특성에 맞게 조절하여 사용자로 하여금 현재의 진행 정도를 쉽게 인지하도록 하여 반복되는 시뮬레이션시에 최적의 메쉬 및 공정 조건을 설정하는데 도움이 되도록 하였다. 산화 공정의 경우에는 시간으로 확산 공정은 계산 단계별로 구성하였으며, 이온 주입의 경우에는 도즈량에 따른 진행 상태를 그래픽으로 나타낸다. 네 번째로, 결과의 출력은 모니터, 프린터, 파일등으로 하여, 사용자가 다차원적인 현상을 그래픽으로 판단할 수 있도록 하며, 파일로 저장과 함께 데이터 베이스 구축이 되도록 구성하였다. 다섯 번째로, 각각의 프로그램을 모듈화하여 현재 개발된 통합 시뮬레이터에 등록된 모델들 외에 새로운 모델을 추가할 경우 기존의 모델들과의 수행시의 충돌을 없도록 하며, 시간과 정확도라는 조화에 맞는 최적의 통합 시뮬레이터가 되도록 하였다. 객체 지향적인 C++컴파일러 언어를 사용하여 객체지향 개념을 도입하여 최적의 모듈화를 구성하였고, 각 공정 별로 동적으로 링크되는 라이브러리를 생성하여 프로그램 코드를 분산처리가 용이하도록 하였다. 통합 시뮬레이터 구성을 위한 전체적인 모듈 구성은 그림 1.과 같다.

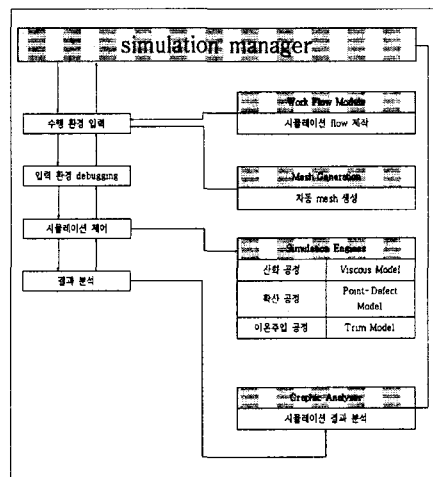


그림 1. 시뮬레이터의 모듈 구성 및 데이터 흐름도

4. 결과

4.1. 입력 모듈

사용자가 작성한 입력 파일이 타당한가에 대한 검증은 기존의 시뮬레이터의 경우 포스트 스크립트 언어를 해석해 가며 실행 중에 점검하였다. 이는 실행이 시작되어야 그 오류를 발견할 수 있어 많은 시간적인 손실을 가져올 수 있다. 본 시뮬레이터는 입력이 완료됨과 동시에 검증을 함으로써 보다 사용자에 편의를 도모하였으며, 산화, 확산 및 이온 주입에 대한 입력 환경 인터페이스는 그림 2에 나타내었다.

4.2. 출력 모듈

그림 3의 (a)는 스트레스-의존적 점성 모델을 이용한 산화 공정 시뮬레이션의 진행 과정으로, 공정 조건은 온도 1000℃, 시간 30분, 산화막 두께 0.03μm, 마스크 두께 0.15μm이다. 그림 3의 (b)는 점결함 모델을 이용한 선확산 공정 시뮬레이션의 수행 과정을 보인 것이다. 실리콘 기판이 1.0×10¹⁴/cm² 도핑된 상태에서 온도 1000℃, 시간 10분, 원도우 크기 0.4μm, 경계 농도 1.0×10²⁰/cm³의 공정 조건으로 실행한 경우이다. 그림 3의 (c)는 몬테-카를로 모델을 이용한 3차원적인 이온 주입 시뮬레이션의 결과로서, <100>방향의 실리콘 정질에 붕소 이온을 5keV의 입사 에너지로 원도우 크기 0.02μm에 이온 주입한 결과를 나타내고 있다.

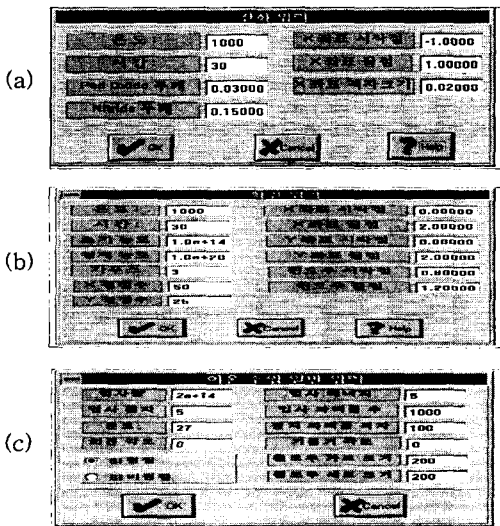


그림 2. 시뮬레이터의 모듈 구성 및 데이터 흐름도
(a)산화공정입력 (b)확산공정입력 (c)이온주입공정입력

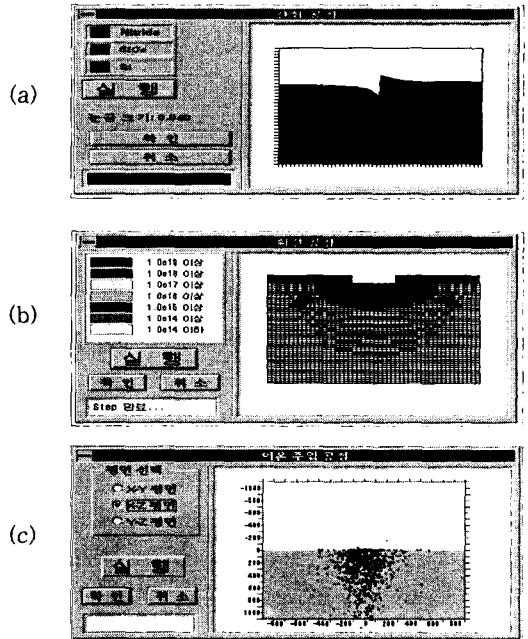


그림 3. 시뮬레이터의 모듈 구성 및 데이터 흐름도
(a) 산화공정결과 (b)확산공정결과 (c)이온주입공정결과

참고문헌

[1] R. W. Dutton and Z. Yu, *Technology CAD-Computer simulation of IC processes and devices*, Kluwer Academic Publisher, Massachusetts, 1993

[2] W. Fichtner, D. J. Rose and R. Bank, "Semiconductor Device Simulator", *IEEE Trans. Electron.Device*, ED-29 p.218-231, 1981.

[3] D. J. Chin, *Two Dimentional Oxidation Modeling and Applications*, Stanford University, June 1983

[4] C. C. Lee, A. L. Palisoc and J. M. W. Baynham "Thermal Analysis of Solid-State Devices Using the Boundary Element Method" *IEEE Trans. Electron Dev.*, Vol.35, No.7, July 1988