

컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 3차원적 구조에서의 저항 특성 분석에 관한 연구

A study on Calculating the Resistance characteristics analysis on Three-Dimensional Structure Using Computer Simulation Method.

장우순*

서울호서전문학교 & 벨코리아(주) 광통신연구소
jws21c@naver.com

Abstract

By now, we have been analysing the resistance values on 3 dimensional structure using experimental statical method or theoretical modeling, while devices miniaturizing reveals the limitation of the traditional methods to calculate 3 dimensional resistance. In addition, 2 dimensional analysing can not produce 3 dimensional characteristic following miniaturizing.

To solve the limitations, we must do high level modeling of semi-conductor process. In this thesis, we analyzed the Laplace equation that is the basic and important for 3 dimensional structure resistance with computer simulation method and on the basis of this, analyzed the characteristic of resistance of 3 dimensional structure communication semiconductor device.

I. 서론

최근 통신반도체 소자의 고집적화와 대용량화의 추세에 의하여 소자의 설계 및 공정의 정확성이 절실히 요구되고 있다. 또한 통신반도체소자의 소형화와 집적도의 증가는 칩 상의 신호전송 및 저항체 그리고 전체 길이를 증가시키고 있는 추세에 있다.

집적회로의 속도가 선형적으로 증가하기 위해서는 도체의 단위 길이 당 저항 값의 변화가 최소화되어야 하며 이를 위해서는 도체의 폭 및 두께 그리고 도체선간의 간격이 같은 비율로 비례축소[1] 되어야 한다. 3차원적 구조에서의 저항 값을 해석하는 방법으로 지금까지는 실험적 고찰에 의한 통계적 방법이나 이론적인 모델링으로 접근해 왔으나 소자의 미세화가 증가할수록 아주 미세한 구조에서의 3차원적 저항 값을 분석하는데 기존의 해석적 방법에서는 한계를 나타내고 있다. 또한 2차원적 해석[2-3]만으로는 미세화에 수반되는 3차원적 특성을 전혀 예측할 수 없게 되었다.

이러한 한계를 극복하기 위한 반도체 공정의 고차원적인 모델링이 반드시 따라야하므로 본 논문에서는 3차원적 구조에서의 저항에 있어 기본적인, 중요한 라플라스 방정식을 컴퓨터시뮬레이션 방법을 통하여 해석하고 이를 근거로 3차원적 구조에서의 통신반도체 소자 부분의 저항 값의 특성을 분석하였다.

II. 3차원 구조에서의 저항 이론

VLSI회로의 성능은 전송선의 RC지연시간[4]에 영향을 받는다.

Diffusion 저항이나 Poly-Silicon 저항은 기생 정전용

량[5] 과 함께 회로의 지연시간에 많은 영향을 주므로 이에 대한 정확한 저항 값을 추출하는 것이 필요하다.

지금까지 이들 저항 값은 2차원적인 방법으로 비교적 간단한 구조에서 구해졌다. 그러나 저항 구조의 복잡화에 따라 전류흐름에 왜곡이 생겨 단순한 Length/Width의 비율과 Sheet Resistivity [2-3]만으로는 저항으로 정확히 계산하기 어렵다. 그러므로 일반적인 해법으로 물리 방정식을 수치 해석적으로 접근하여 3차원적으로 저항을 계산하여야 한다.

평형상태에서는 확산 전류는 무시 가능하므로 유동전류만을 고려하고 저항의 단말경계에서만 전류의 유출입이 있다고 가정한다. 이러한 경우 저항 내에서는 Laplace Equation을 만족한다. 여기에 적절한 경계조건을 부여하여 전위를 구한 후 저항을 구하였다. 즉 port 0에는 $\phi_0=0$, port 1에는 $\phi_1 = V_{01}$ 의 경계조건을 부여하여 Laplace Equation을 푼다.

그리고 총 전류는 $I_c = \int_c \sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} dc$ 에 의해 구해진다. 여기서 port는 해당하는 접촉단말이고 c는 접촉단말 경계이다.

따라서 저항값은 $R_{01} = \frac{V_{01}}{I_c}$ 이 계산된다.

일반적으로 Laplace 방정식을 수치 해석적으로 풀기 위해서는 유한차분법, 경계요소법, 유한요소법등이 사용되고 있다. 여기서는 유한요소법을 채택하였는데 이는 다른 공정과의 연계성이 우수하며 구조적인 영향을 용이하게 취급할 수 있는 장점이 있다. 단점으로는 자료 취급으로 인한 계산 시간의 증가와 컴퓨터의 대형화가 요구되지만 본 연구에서는 전진해법[6]을 이용하여 적

은 메모리 사용으로 Works-tation상에서 해를 구할 수 있도록 하였다.

2.1. n개의 Terminal에서 저항계산

n 개의 terminal을 가진 저항영역이 있을 때, I_j 를 terminal j 를 통하여 들어가는 총전류라고 I_{jk} 를 port j 와 port k 사이의 저항에 흐른 Branch전류라 할 때

$$I_j = \sum_{k=1}^n i_{jk}(k \neq j) \quad (2-2)$$

이때 인가전압이 다음과 같이 $V_j=1$ and $V_k=0$ ($k=1, \dots, j-1, j+1, \dots, n$)

으로 주어질 때 port k 를 통하는 총 전류 i_k 는

$$I_k = i_{kj} \quad (k=1, \dots, j-1, j+1, \dots, n) \quad (2-3)$$

이고 port j 와 port k 사이의 저항

$$R_{kj} = \frac{\Delta V_{jk}}{I_k} = \frac{1}{I_k} \quad (k=1, \dots, j-1, j+1, \dots, n) \quad (2-4)$$

실제로 전류 I_k 는 다음의 적분 공식에 의해 계산된다.

$$I_k = \int_c \frac{\partial \Phi}{\partial n} dc \quad (2-5)$$

(여기서 c 는 contact terminal boundary)

2.2. Laplace Equation과 경계조건

전류밀도 j 와 관계 e 사이의 관계는

$$\text{div } j = 0 \quad (j = \sigma e) \quad (2-6)$$

여기서 σ 는 sheet resistivity의 역수(conductivity)이다.

potential Φ 는 $e = -\nabla \Phi$ 로 존재한다.

위의 관계식에서 다음의 방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2-7)$$

위 식은 Laplace Equation의 일반적인 형태이다.

경계조건으로는 Contact terminal boundary에 대해 전위 값은 다음 식으로 주어진다.

$$\Phi = \Phi_D \quad (2-8)$$

다른 경계에서의 조건은 $j = \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ 로 주어진다.

왜냐하면 contact terminal boundary이외에서는 흐르지 않는다고 가정했기 때문이다.

III. 수치해법

저항구조 내에서의 전류를 구하기 위해서는 저항내의 전위를 알아야 한다. 저항내의 전위변화는 Laplace 방정식을 만족하게 되므로 Laplace방정식을 3차원적으로 해석한다.

현재 일반화되어 있는 수치 해석 기법으로는 유한 차분법, 유한 요소법 및 경계 요소법 등이 있다. 가장 많이 쓰이는 유한 차분법은 많은 알고리즘과 수치 해석방법이 잘 알려져 있기 때문에 어떠한 문제에도 쉽게 적용

할 수 있다. 또한 사각형 격자의 이용으로 둔각 삼각형에서 생기는 영역 적분의 문제도 쉽게 해결할 수 있으며 컴퓨터 계산 시 내부 데이터의 구조를 간단하게 만들고 구조에 대한 정보를 빠르게 이용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 주로 사각형 격자 채용으로 시뮬레이션에 필요한 비 평탄 구조를 다루기에는 어려움이 많다. 경계요소법 Green 함수에 기초한 수치 해석 기법으로 구조에 대한 융통성이 용이하고 차수를 하나 줄임으로써 컴퓨터 메모리의 효율성 측면에서 우수 하지만 3차원 구조의 해석을 위한 이론적인 전개와 응용이 빈약한 실정이므로 3차원 확산 공정을 모델링하기 위해서는 위험 부담이 높은 단점이 있다. 유한 요소법의 경우에는 구조적인 영향을 용이하게 취급할 수 있는 반면 대용량의 데이터 취급으로 인한 컴퓨터의 대형화가 필요하다. 그러나 전진해법(frontal solver)[7]에 비교할 수 없을 만큼의 적은 메모리 용량으로 쉽게 이를 극복할 수 없으므로 본 논문에서는 3차원 Laplace 방정식의 수치 해석 방법으로 유한 요소법을 채택하였다.

본 논문에서는 주어진 해석 영역을 몇 개의 부 영역으로 분할한 후 부영역의 각 절점에 대한 번호, 좌표 및 가중치를 가지고, 20개의 절점을 갖는 육면체 형상 함수를 이용하여 새로운 좌표와 절점 번호를 자동으로 재배열하는 알고리즘으로 자동 격자 발생기에 이용하였다. 격자발생을 위해 사용된 기본 요소는 그림 3-1과 같다.

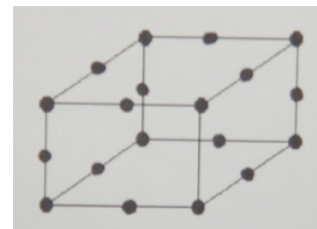


그림 3-1 해석 구조를 분할하기 위한 3차원 기본 요소

본 격자 발생기는 주어진 해석 구조를 분할하기 위하여 사용자가 정의한 부 영역에서 x,y,z 각 방향의 가중치로 부 영역을 분할한 후 소격자의 요소와 절점 좌표를 재배열한다. 격자 발생을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

① 해석하고자 하는 3차원 구조를 몇 개의 부 영역으로 나눈다. 이 때 해석영역이 서로 다른 물질로 이루어졌다면 반드시 서로 다른 물질의 경계를 이용하여 부 영역을 만들어야 한다.

② 각각의 부 영역은 독립적으로 생각할 수 있으며 각 부영역의 x,y,z 방향으로 주어진 가중치와 절점 개수에 따라 새로운 요소를 만들어 절점 번호 및 좌표를 재배열한다. 이 때 발생하는 좌표는 식 (3-1)로 표현된다.

$$\sum_{j=1}^n (K_{ij} C_j) = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3-1)$$

n : 형상함수의 절점수
 K_{ij} : 보강 행렬
 C_j : j 절점에서의 전위

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + \frac{2(W_x)_i}{W_x^i} & W_x^T &= \sum_{j=1}^{NDIV} (W_x)_j \\ y_i &= y_{i-1} + \frac{2(W_y)_i}{W_y^i} & W_y^T &= \sum_{j=1}^{NDIV} (W_y)_j \\ z_i &= z_{i-1} + \frac{2(W_z)_i}{W_z^i} & W_z^T &= \sum_{j=1}^{NDIV} (W_z)_j \end{aligned} \quad (3-2)$$

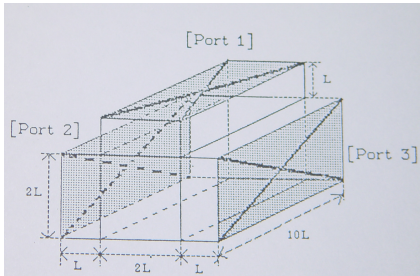
W_x, W_y, W_z : x, y, z 방향의 가중치

NDIV : 부 영역을 x, y, z 방향으로 각각 분할하고자 하는 절점수

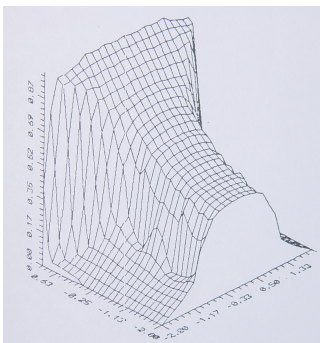
③ 한개의 부 영역을 식 (3-2)에 의하여 NDIV x NDIV x NDIV 만큼의 요소로 분할한 다음 각 부영역 간의 경계에 공통으로 존재하는 절점 번호를 없앤다.

IV. 시뮬레이션 결과

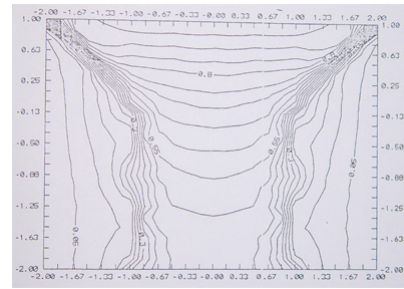
4.1. 해석 구조 I



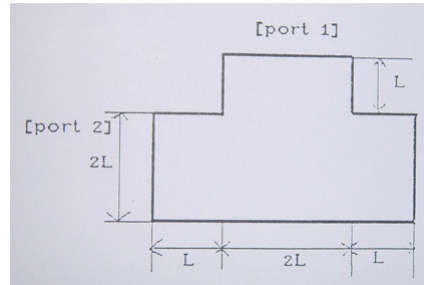
a. 시뮬레이션 구조



b. $y=0$ 인 평면 ($x-z$ 평면)에서의 전위 분포



b-1. $y=0$ 인 평면 ($x-z$ 평면)에서의 전위 분포

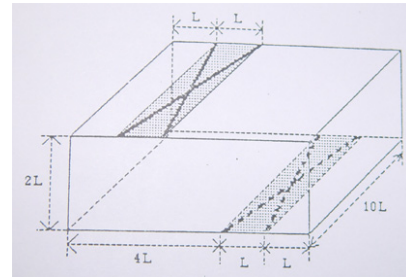


c. 2차원 구조(비교 구조)

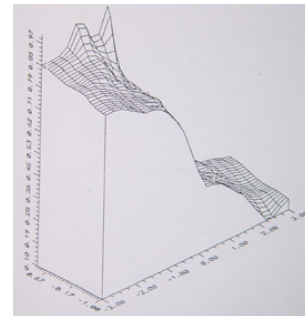
그림4-1 해석구조 I의 구조 및 전위분포와 저항치 계산결과

	본 논문	타 논문	비 고
저항	1.65	1.16	$C=10^{19} \text{cm}^{-3}$, $p=5.38 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$

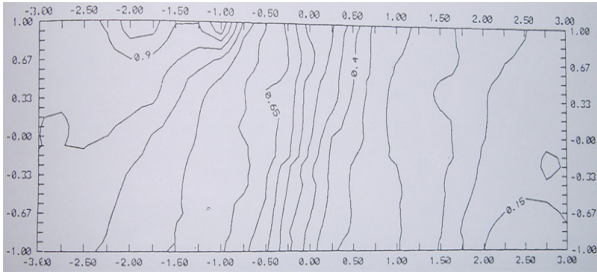
4.2. 해석 구조 II



a. 시뮬레이션 구조



b. $y=0$ 인 평면 ($x-z$ 평면)에서의 전위 분포



b-1. y=0인 평면 (x-z 평면)에서의 전위 분포

$R=1.34m\Omega$
c. 시뮬레이션 결과 치

그림4-2 해석구조 II의 구조 및 전위분포와 저항치 계산결과

4.2. 검토

위와 같이 본론에서 제시한 3차원적 n-terminal의 저항을 실제의 다양한 구조로 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있다.

그림 4.1의 해석 구조 1은 비교적 단순한 3차원적 구조로 port 1에 1[V]를 가하고 port2와 port3에 0[V]를 경계조건으로 한 시뮬레이션 결과로써, 이 구조에 대한 전위분포를 그림(b)에서 나타내었다. 이(b)그림은 y=0인 단면으로 여기서 제시한 구조에 대한 전위의 등고선을 나타내고 있다. 또한, 구조 I에서 구한 저항치는 1.65mΩ 으로, 이 결과 치를 검증하기 위해 타 논문의 2차원적 구조의 저항치를 비교하였다. 타 논문의 결과는 그림 (c)과 같은 2차원적 평면에서의 계산치로써, Z방향의 부분이 무시되었기에 본 연구의 계산치보다 적을 것으로 예상된다.

그림 4-2의 시뮬레이션 구조는 보통의 2차원 구조에서는 시뮬레이션 하기 어려운 구조로서 본 3차원 시뮬레이션으로의 독창성을 보여줄 수 있는 구조이다. 본 구조에서의 전위 분포는 (b) 그림에 나타내었고 저항 계산치는 1.34mΩ 이었다.

위에서 시뮬레이션 한 구조 외에도 본 시뮬레이션은 3차원적 Mesh generator의 구성으로 인하여 실제 device의 complex한 구조의 도선 형태에 대해서도 간단한 input file 작성과 빠른 계산 시간으로 말미암아 저항의 계산치 및 소자 성능분석 및 연구에 크게 유용할 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 논문은 다차원 구조의 도선에서 저항 값을 구하기 위하여 3차원 구조내의 정전압 분포를 도출하였으며, 이에 의한 3차원 구조의 정전위 분포를 해석하며 복잡하고 다양한 구조의 도선에서의 저항 값을 도출하였다.

본 논문에 쓰인 유한요소법은 임의의 공정구조에 대한 모델링이 가능하여 다양한 구조의 저항 값이 계산 가능하게 되었다. 이와 더불어 앞으로 저항 값뿐 아니라 정전용량의 계산으로 소자 내에서의 RC 시상수를 구하여 소자의 동작 상태를 파악하는 것이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] Baccarani, G. , M. R. Worderman, and R. H. Dennard. " Generalized Scaling Theory and its Application to a 1/4 micrometer MOSFET Design, " *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-31,452,1984.
- [2] M. Horowitz and R. W. Dutton, " Resistance extraction from mask layout data," *IEEE Trans. Computer-Aided Design*. vol. CAD-2, no.3. pp.145-150,1983
- [3] T. Mitsuhashi and K. Yoshida. " A resistance calculation algorithm and its application to circuit extraction." *IEEE Trans. Computer Aided Design*. vol. CAD-6, no.3, pp. 337-345, 1987.
- [4] J. Rubinstein et al., " Signal delay in TC tree network," *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, vol. CAD-2, no.3 ,1983
- [5] S.Fukuda N. Shigyo, K. Kato, and S. Nakamura , "A ULSI 2-D Capacitance Simulator for Complex Structure based on actual processes, " *IEEE Trans. Computer-Aided Design* vol. 9, no.1.Jan.1990.
- [6] C. Taylor and T. G . Hughes , *Finite Element Programming of Navier-stokes Equations*, Pineridge press,1981.
- [7] Alan Jennings, *Matrix Computation for Engineers and Scientists* , John Wiley & Sons 1977.