

다층 유전체 매질에서의 Interconnection Line에 대한 Capacitance Parameter 계산에 관한 연구

(A Study on Calculation of Capacitance Parameter for
Interconnection Line in Multilayer Dielectric Media)

金 漢 求*, 郭 桂 達*

(Han Gu Kim and Kae Dal Kwack)

要 約

다층으로 이루어진 유전체 영역내에 여러개의 interconnection line이 존재할 때, 캐패시턴스 파라미터를 계산하는 방법을 제시하였다. 유전체 층의 수와 line의 수는 임의적일 수 있으며, line의 형태는 유한 단면적을 갖거나 무한히 얇은 단면적을 가지고 있다. Line의 표면과 유전체 경계면은 모두 미소구간으로 분할되고, 각각의 미소구간에서의 표면 전하 밀도는 일정한 step-pulse 형태를 취한다고 가정하고서 moment method를 이용하여 표면 전하 밀도를 구하고, 이로부터 캐패시턴스 파라미터를 계산하였다.

Abstract

In this paper, a method for computing the capacitance parameter for a multi-interconnection line in a multilayered dielectric region is presented. The number of interconnection lines and the number of dielectric layers are arbitrary, and the interconnection lines are finite cross section or infinite cross section. The surface of lines and dielectric interface are divided into subsection. The surface charge density of each subsection is a constant step-pulse function for each subsection. After the solution of surface charge density is effected by the method of moments, capacitance parameter is calculated.

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)

接受日字: 1988年 6月 30日

(※ 본 연구는 1988년~1989년도 한국과학재단의 기초지원연구에 의하여 수행된 연구입니다.)

I. 서 론

VLSI (very large scale integration) 회로의 등장은 오늘날 마이크로 전자공학의 여러 분야에 큰 영향을 미치고 있다. 전자공학이 포함되는 모든 분야에서 VLSI 회로는 중요한 일익을 담당하고 있으며,

그 발전 속도는 매년 2배 정도이다. 한편, VLSI 회로의 집적도가 커지면 커질 수록 개별 소자의 크기는 더욱 작아져서, "short-channel effect"가 소자 물리학을 주도하게 되었다.^[1] 이 효과로 인하여 소자물리학, 제작 기술, 소자재료 분야에 있어서 보다 깊은 연구와 이해를 요구하게 되었으며, 이제 회로의 집적도는 기술상의 문제가 아닌 설계 시간에 의해서 제한되는 실정이 되었다. 따라서, VLSI 회로의 설계를 위해서는 여러가지 Tool을 포함하는 포괄적인 CAD(computer-aided-design) 시스템이 필수적이며, 이러한 Tool 중의 하나에는 주어진 마스크(mask) 형태가 원 설계에서 요구하는 기능을 수행하는가를 알아보는 설계의 검증(design verification)이 있다. 설계의 검증을 위해서는 마스크상에 주어진 기하학적 정보를 회로 정보로 변환시켜 주는 것이 필요한데, 회로의 집적도가 증가함으로 인해서 이 과정이 점점 어려워지고 있다.

또한, 집적도의 증가는 chip상의 interconnect들의 전체길이를 증가 시키는 반면에 개개의 interconnect 그 자체의 크기는 작게 함으로써, 전체적인 line의 저항을 크게 증가시키게 되었다. 한편, fringing field에 의한 캐패시턴스 성분도 더 이상 무시할 수 없게 되었다.^[2] Interconnection line에서의 저항값과 캐패시턴스 값은 회로의 지연시간(delay time)과 직접적인 관련을 가진 값이기 때문에, 보다 정확하게 그 값을 구할 필요가 있는데, 일반적으로 line의 저항값은 line의 형태에 대한 정보가 주어지면 비교적 쉽게 구할 수 있지만, 캐패시턴스 값은 fringing 캐패시턴스 성분을 무시할 수 없기 때문에 평행 평판(parallel-plate)계산 방법을 사용할 수가 없다. 따라서, interconnect의 캐패시턴스 값은 회로동작의 성능을 결정하는 대단히 중요한 요인이 되기 때문에 오래전부터 정확하면서도 간편하게 이 캐패시턴스 값을 구하기 위한 연구가 진행되어 왔다.^{[3]-[18]}

지금까지 연구되어 온 방법으로는 해석적인 방법, 미분 방법, 적분 방법 등 세가지가 있다. 해석적인 방법은 특정한 형태에서만 사용할 수 있기 때문에 일반적이지 못하다.^[3] 미분 방법은 poisson의 미분식을 기본식으로 한 것으로 FDM, FEM 등이 있다.^{[4],[5]} 이 방법은 boundary 내의 모든 grid point에서의 전위를 계산한 후에 캐패시턴스를 구해야 하기 때문에 식이 복잡할 뿐만 아니라 computer 소비 시간이 길다는 단점이 있다. 그러나, 적분 방법은 Poisson의 적분식을 기본식으로 한 것으로 Green's function과 전하 밀도의 convolution으로 주어진다. 그러므로 식이 간단하고 해를 구하기가 쉬우며 computer 소비시

간도 짧다.^{[6]-[9]}

이상의 세가지 방법중에서, 본 논문에서는 적분 방법을 사용하여 캐패시턴스 값을 계산하였다. 특히 다층의 유전체 층에서의 interconnection line에 대한 캐패시턴스 파라미터를 계산하였으며, 계산 결과를 [2], [6], [8]의 결과와의 비교를 통해서 본 논문에서 사용한 이론과 방법의 타당성을 입증하였다.

II. 캐패시턴스 계산 모델과 방법

오늘날 VLSI 회로들은 작은 물리적 차원을 가진 거대하고도 복잡한 시스템이다. 소자들은 특별한 관심을 가져야 할 만큼 그 크기가 작을 뿐만 아니라, interconnect들 또한 회로 시뮬레이션에서 고려되어야 한다. Interconnect의 전기적 특성에 대한 보다 깊은 이해는 오늘날 집적회로의 설계와 해석에 있어서 필수적이다. 일반적으로 사용되고 있는 대부분의 VLSI 회로에서 사용되는 signal에 포함되는 최대 주파수 성분은 회로 성분의 물리적 차원보다 훨씬 큰 파장(wavelength)을 가지고 있다. 따라서, 회로의 전기적 해석을 위해서 lumped circuit model을 사용할 수가 있다. Lumped circuit model은 transmission line의 1차 근사로서 고려될 수 있으며, 이는 또한 interconnection line에 대해서도 적용할 수 있다.

보통 VLSI 회로의 2차원 형태는 그림 1과 같이 나타나는데, 그림에서 보는 바와 같이 channel-stopping ion implantation이 일반적으로 interconnect가 존재하는 field oxide 층 아래에 있기 때문에 이것을 그림 2의 계산형 모델에서는 접지평면으로 고려할 수가 있으며, 이때 이 접지평면은 계산의 단순화를 위해 무한 평면이라고 가정한다. 그리고 최상층 부분은 항상 자유 공간이라고 가정한다.^[2]

그림 2의 계산형 모델은 접지평면 위에 몇개의 interconnection line의 길이 방향 단면적이 존재하고 있

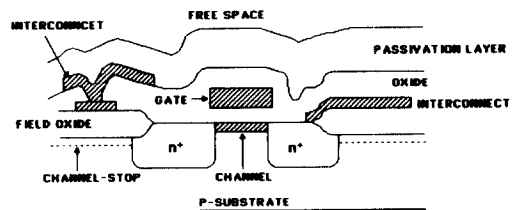


그림 1. 전형적인 집적회로의 단면도

Fig. 1. A cross-sectional view of a typical integrated circuit.

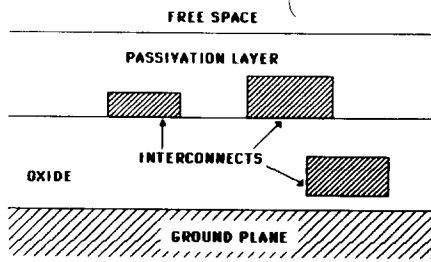


그림 2. Interconnect 캐패시턴스의 계산형 모델
Fig. 2. Computational model of interconnect capacitance.

는 경우로서, 이때 line들은 간단히 도체라고 가정을 한다. 여기서 생각할 수 있는 캐패시턴스 파라미터는 도체와 접지면 사이의 self 캐패시턴스와 도체 사이의 coupling 캐패시턴스라는 2 가지 형태가 있다. 접지평면 위의 도체의 수가 N이라고 하면, 도체표면의 전하량을 Q_1, Q_2, \dots, Q_N , 접지면에 대한 도체표면의 전위(potential)를 각각 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ 으로 나타낼수 있다. 전하량과 도체표면의 전위사이의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$Q_i = \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot \phi_j \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= c_{11}\phi_1 + c_{12}\phi_2 + \dots + c_{1N}\phi_N \\ Q_2 &= c_{21}\phi_1 + c_{22}\phi_2 + \dots + c_{2N}\phi_N \\ &\vdots \\ Q_N &= c_{N1}\phi_1 + c_{N2}\phi_2 + \dots + c_{NN}\phi_N \end{aligned} \quad (1)$$

(1)식에서 $i=j$ 일때의 c_{ij} 를 용량계수(coefficient of capacitance), $i \neq j$ 일때의 c_{ij} 를 유도계수(coefficient of induction)라고 하며, 다음과 같은 성질을 가진다.¹⁾

$$\begin{aligned} c_{ij} &= c_{ji} & i, j &= 1, 2, \dots, N \\ c_{ii} &> 0 & i &= 1, 2, \dots, N \\ c_{ij} &< 0 & i \neq j &= 1, 2, \dots, N \\ \sum_{j=1}^N c_{ij} &> 0 & i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

또한, (1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{11}\phi_1 + C_{12}(\phi_1 - \phi_2) + \dots + C_{1N}(\phi_1 - \phi_N) \\ Q_2 &= C_{21}(\phi_2 - \phi_1) + C_{22}\phi_2 + \dots + C_{2N}(\phi_2 - \phi_N) \\ &\vdots \\ Q_N &= C_{N1}(\phi_N - \phi_1) + C_{N2}(\phi_N - \phi_2) + \dots + C_{NN}\phi_N \end{aligned} \quad (3)$$

(3)식은 전하량과 전위사이의 관계를 self 캐패시턴스와 coupling 캐패시턴스를 이용하여 나타낸 것이다.

(1)식과 (3)식은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$\begin{aligned} C_{ii} &= \sum_{j=1}^N c_{ij} \\ C_{ij} &= -c_{ij} \end{aligned} \quad (4)$$

본 논문에서는 용량계수와 유도계수를 먼저 구한 다음에 (3)식의 관계로부터 self 캐패시턴스와 coupling 캐패시턴스를 구하기로 한다.

< 용량계수의 계산 >

i번째 도체표면의 전위를 1로 두고, 나머지 모든 도체표면의 전위를 0으로 하면 (1)식에 의해서

$$Q_i = c_{ij} \quad (i=j) \quad c_{ij} = Q_i \quad (5)$$

가 된다.

< 유도계수의 계산 >

i번째 도체와 j번째 도체표면의 전위를 1로 두고, 나머지 모든 도체표면의 전위를 0으로 하면 (1)식에 의해서

$$\begin{aligned} Q'_i &= c_{ii} + c_{ij} \\ Q'_j &= c_{ij} + c_{jj} \end{aligned}$$

가 되고, 위의 두 관계식과 (5)식에 의해서 유도계수 $c_{ij} (=c_{ji})$ 는

$$c_{ij} = \frac{1}{2} (Q'_i + Q'_j - Q_i - Q_j) \quad (6)$$

가 된다.

III. 공식의 유도과 적분식의 구성

일반적으로 도체의 단위 길이에 대한 캐패시턴스 파라미터를 구하는 문제는 도체 표면의 표면 전하밀도와 도체 표면의 전위값과 관계되는 적분식을 푸는 것으로 시작되며, 이 적분식을 풀어 각 도체의 단위 길이에 대한 전하량 Q를 구하고, 이로부터 캐패시턴스를 구한다.

그림 2와 같이 다층의 유전체와 많은 도체들이 존재하는 경우에 대해서 살펴보자. 여기서는 문제의 단순화를 위해서 total 전하량과 관련된 free-space Green's function을 이용해서 얻어진 적분식을 사용했으며, 최상층의 접지평면(존재할 경우)과 유전체층의 길이를 무한하다고 보지 않고 유한으로 근사시켰다.

Total 전하량을 σ_T , 자유 전하를 σ_F , 분극 전하를 σ_P 라고 하면, 다음 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_F + \sigma_P & (\text{도체 - 유전체 경계면에서}) \\ \sigma_T &= \sigma_P & (\text{유전체 - 유전체 경계면에서}) \end{aligned} \quad (7)$$

도체 표면상의 임의의 점 (x', y') 에서 표면 전하 밀도가 $\sigma_T(x', y')$ 인 도체의 perimeter의 좌표를 t 에 의한 매개 변수로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x' &= x(t) \\ y' &= y(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, t 는 도체 perimeter를 따라 측정된 arc length이다. 도체 표면의 단위 길이에 대한 전하량은 다음의 식으로 주어진다.

$$Q_i = \int \sigma_T(x(t), y(t)) dt \quad (9)$$

그리고, total 전하량과 자유 전하와의 관계식은

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \\ \sigma_F &= \epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} \\ \sigma_F(x', y') &= \frac{\epsilon(x', y')}{\epsilon_0} \sigma_T(x', y') \end{aligned} \quad (10)$$

가 되므로, (10)식을 (9)식에 대입하면

$$Q_i = \int \frac{\epsilon(x(t), y(t))}{\epsilon_0} \sigma_T(x(t), y(t)) dt \quad (11)$$

로 된다.⁸⁾

결국, 우리가 구하고자 하는 캐패시턴스 파라미터는 먼저 적분식으로부터 total 전하량 σ_T 를 구하고, (11)식으로부터 도체의 단위 길이에 대한 전하량 Q_i 를 구한 다음, (5), (6)식을 통해서 구해진다.

도체의 수를 N_c , 유전체층의 수를 N_d 라고 하면, 도체-유전체 경계면의 수 J_1 과 유전체-유전체 경계면의 수 J_2 는

$$\begin{aligned} \text{i) 최상층에 접지 평면이 없을때} \\ J_1 &= N_c \\ J_2 &= N_d - 1 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{ii) 최상층에 접지 평면이 있을때} \\ J_1 &= N_c + 1 \\ J_2 &= N_d - 1 \end{aligned} \quad (13)$$

과 같으며

$$J = J_1 + J_2 \quad (14)$$

이다.

단위 길이당 1의 전하량을 지닌 선전하가 접지 평면 위의 유전체층과 나란하게 놓여 있으면서, 점 (x', y') 를 수직방향으로 통과한다고 가정했을 때, 점 (x', y') 을 통과하는 단위 선전하에 의한 임의의 점 (x, y) 에서의 전위를 $G(x, y | x', y')$ 라고 하며 이것이 바로 free-space Green's function이 된다 이것이 의미하는 바는 접지 평면 위의 임의의 점 (x', y') 에 단위 전

하가 존재할 때, 이 전하에 의해서 접지 평면 아래에 크기가 같고 부의 영상 전하가 유기되는데, 이 두 개의 전하에 의해서 이루어지는 전위에 대한 기본식으로서, 선전하와 전계와의 관계식으로부터 유도되었다.^{19)~21)}

$$G(x, y | x', y') = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_{l_i} \left(\frac{(x-x')^2 + (y+y')^2}{(x-x')^2 + (y-y')^2} \right) \quad (15)$$

점 (x', y') 에 있는 전하량이 $\sigma_T(x', y')$ 일때의 전위는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= \sum_{i=1}^N \int_{l_i} G(x, y | x', y') \sigma_T(x', y') dl' \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^J \int_{l_i} \sigma_T(x', y') \oint_{l_i} \left(\frac{(x-x')^2 + (y+y')^2}{(x-x')^2 + (y-y')^2} \right) dl' \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^J \int_{l_i} \sigma_T(x', y') \oint_{l_i} \left(\frac{(x-x')^2 + (y+y')^2}{(x-x')^2 + (y-y')^2} \right) dl' \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, 적분은 i 번째 도체 perimeter를 따라 행한 것으로, 적분소 dl' 은 i 번째 도체 perimeter에 대한 미소 구간을 나타내며, summation은 접지 평면 위에 존재하는 모든 도체를 고려한 것이다.

또한, 전계 $\mathbf{E}(x, y)$ 는

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y) &= -\nabla \phi(x, y) \\ &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^J \int_{l_i} \sigma_T(x', y') \left(\frac{(x-x')\mathbf{u}_x + (y-y')\mathbf{u}_y}{(x-x')^2 + (y-y')^2} - \frac{(x-x')\mathbf{u}_x + (y-y')\mathbf{u}_y}{(x-x')^2 + (y+y')^2} \right) dl' \end{aligned} \quad (17)$$

가 된다. 특히, 유전체-유전체 경계면에서의 전계 $\mathbf{E}(x, y)$ 는 Gauss의 법칙에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^\pm(x, y) &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^J \int_{l_i} \sigma_T(x', y') \left(\frac{(x-x')\mathbf{u}_x + (y-y')\mathbf{u}_y}{(x-x')^2 + (y-y')^2} - \frac{(x-x')\mathbf{u}_x + (y-y')\mathbf{u}_y}{(x-x')^2 + (y+y')^2} \right) dl' \pm \frac{\sigma_T(x, y)}{2\epsilon_0} \mathbf{u}_y \quad \begin{matrix} (x, y) \text{ on } l_i \\ i = J_1 + 1, J_1 + 2, \dots, J \end{matrix} \end{aligned} \quad (18)$$

각 유전체 경계면에서 변위vector (displacement vector) $\mathbf{D}(x, y)$ 는 수직 성분(y-성분)이 연속이다. 즉,

$$\epsilon_{i-j_1} \mathbf{E}^+(x, y) \cdot \mathbf{u}_y = \epsilon_{i+1-j_1} \mathbf{E}^-(x, y) \cdot \mathbf{u}_y \quad (19)$$

이고, (19)식에 (18)식의 $\mathbf{E}^+(x, y)$ 와 $\mathbf{E}^-(x, y)$ 를 대입한 후에 $(\epsilon_{i-j_1} - \epsilon_{i+1-j_1})$ 으로 나누면 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\frac{(\epsilon_{i-j_1} + \epsilon_{i+1-j_1})}{2\epsilon_0(\epsilon_{i-j_1} - \epsilon_{i+1-j_1})} \sigma_T(x, y) + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \sum_{i=1}^j \int_{I_i} \sigma_T(x', y') \left(\frac{(y-y')}{(x-x')^2 + (y-y')^2} - \frac{(y+y')}{(x-x')^2 + (y-y')^2} \right) dI' = 0 \quad (20)$$

이제 도체-유전체 경계면에서의 potential에 대한 (16)식과 유전체-유전체 경계면에서의 전계에 대한 식 (20)식을 이용해서 total 표면 전하 밀도 $\sigma_T(x', y')$ 를 구하기로 하자.

먼저 도체-유전체 경계면과 유전체-유전체 경계면을 각각 N_i 개의 미소구간(subsection)으로 나누고, 각 미소구간에 있어서는 균일한 step-pulse형태의 전하 밀도를 이룬다고 가정한다. 특히 미소구간을 나누는데 있어서 본 논문에서는 모든 구간의 간격을 일정하게 하지 않고 도체-유전체 경계면에서는 모서리 양쪽 끝으로 갈수록 구간을 짧게 나누고, 유전체-유전체 경계면에서는 모든 간격이 등간격이 되도록 나누는데, 이는 도체에 있어서 모서리 쪽이 전하밀도가 크기 때문에 각 구간에서의 전하밀도의 차를 작게 하기 위함이다.

1) 도체-유전체 경계면에서

$$x_{i, M_{k+j}} = \left(\frac{a_{i, k+1} + a_{i, k}}{2} \right) - \left(\frac{a_{i, k+1} - a_{i, k}}{2} \right) \cdot \cos \frac{(j-1)}{K_k} \pi \quad (21)$$

$$y_{i, M_{k+j}} = \left(\frac{b_{i, k+1} + b_{i, k}}{2} \right) - \left(\frac{b_{i, k+1} - b_{i, k}}{2} \right) \cdot \cos \frac{(j-1)}{K_k} \pi$$

2) 유전체-유전체 경계면에서

$$\begin{aligned} x_{i, M_{k+j}} &= a_{i, k} + \frac{(j-1)}{K_k} \cdot (a_{i, k+1} - a_{i, k}) \\ y_{i, M_{k+j}} &= b_{i, k} + \frac{(j-1)}{K_k} \cdot (b_{i, k+1} - b_{i, k}) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서,

$$j = 1, 2, \dots, K_k$$

$$M_k = K_1 + K_2 + \dots + K_{k-1}$$

$a_{i, k}$: i 번째 경계면에서 k 번째 꼭지점의 x -좌표

$b_{i, k}$: i 번째 경계면에서 k 번째 꼭지점의 y -좌표

K_k : k 번째 꼭지점과 $(k+1)$ 번째 꼭지점 사이의 subsection의 수

M_k : i 번째 경계면에서 전체 subsection의 수 (= N_i)

각각의 경계면을 N_i 개의 미소구간으로 나누면, 각 미소구간에서의 total 표면 전하 밀도는 σ_{Tmn} 으로 표시되고, 이는 m 번째 경계면의 n 번째 미소구간에서의 전하 밀도이다.

그림 3은 m 번째 경계면에서의 하나의 미소구간을 나타낸 것으로서, (x_{mn}, y_{mn}) 은 구간의 중점의 좌표, Δ_{mn} 은 구간의 길이, θ_{mn} 은 구간이 이루는 각도를 나타낸다.

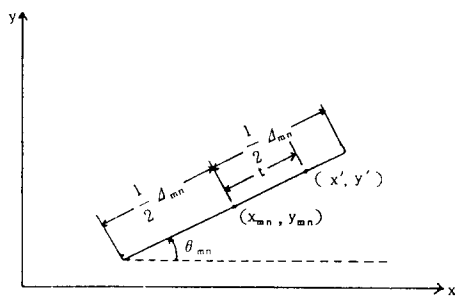


그림 3. 길이 Δ_{mn} , 중점 (x_{mn}, y_{mn}) , 각도 θ_{mn} 인 line segment

Fig. 3. The straight line segment Δ_{mn} with length Δ_{mn} , midpoint (x_{mn}, y_{mn}) and orientation θ_{mn} .

미소구간 내의 임의의 점 (x', y') 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x' &= x_{mn} + t \cos \theta_{mn} \\ y' &= y_{mn} + t \sin \theta_{mn} \end{aligned} \quad (-\Delta_{mn}/2 \leq t \leq \Delta_{mn}/2) \quad (23)$$

그리고, (16)식과 (20)식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

1) 도체-유전체 경계면에서 [(16)식]

$$\begin{aligned} &\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^{N_m} \int_{\Delta_{mn}} \sigma_{Tmn} \ln \left(\frac{[x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn})]^2}{[x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn})]^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{[y_{ij} + (y_{mn} + t \sin \theta_{mn})]^2}{+ [y_{ij} - (y_{mn} + t \sin \theta_{mn})]^2} \right) dt = V_{ij} \\ &i = 1, 2, \dots, J \quad m = 1, 2, \dots, J \\ &j = 1, 2, \dots, N_i \quad n = 1, 2, \dots, N_m \end{aligned} \quad (24)$$

(24)식에서 적분항을 다음과 같이 정의하면

$$S_{mn}(i, j) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\Delta mn/2}^{\Delta mn/2} \varrho_n \left(\frac{(x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn}))^2 + (y_{ij} + (y_{mn} + t \sin \theta_{mn}))^2}{(x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn}))^2 + (y_{ij} - (y_{mn} + t \sin \theta_{mn}))^2} \right) dt \quad (25)$$

(24)식은

$$\sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^{Nm} S_{mn}(i, j) \cdot \sigma_{\tau mn} = V_{ij} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, J \\ j = 1, 2, \dots, Ni \end{matrix} \quad (26)$$

와 같이 쓸 수 있다. 그리고, (26)식에서 V_{ij} 값은 1 또는 0의 값을 갖는다.

2) 유전체-유전체 경계면에서 ((20)식)

$$\frac{(\epsilon_{i-J1} + \epsilon_{i+1-J1})}{2\epsilon_0(\epsilon_{i-J1} - \epsilon_{i+1-J1})} \sigma_{\tau ij} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^{Nm} \int_{\Delta mn} \sigma_{\tau mn} \left(\frac{y_{ij} - (y_{mn} + t \sin \theta_{mn})}{(x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn}))^2 + (y_{ij} - (y_{mn} + t \sin \theta_{mn}))^2} - \frac{y_{ij} + (y_{mn} + t \sin \theta_{mn})}{(x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn}))^2 + (y_{ij} + (y_{mn} + t \sin \theta_{mn}))^2} \right) dt = 0$$

$$\begin{matrix} i = J1+1, J1+2, \dots, J & m = 1, 2, \dots, J \\ j = 1, 2, \dots, Ni & n = 1, 2, \dots, Nm \end{matrix} \quad (27)$$

(27)식에서 적분항을 다음과 같이 정의하면

$$I_{mn} 1 = \int_{-\Delta mn/2}^{\Delta mn/2} \frac{y_{ij} - (y_{mn} + t \sin \theta_{mn})}{((x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn}))^2 + (y_{ij} - (y_{mn} + t \sin \theta_{mn}))^2)} dt \quad (28)$$

$$I_{mn} 2 = \int_{-\Delta mn/2}^{\Delta mn/2} \frac{y_{ij} + (y_{mn} + t \sin \theta_{mn})}{((x_{ij} - (x_{mn} + t \cos \theta_{mn}))^2 + (y_{ij} + (y_{mn} + t \sin \theta_{mn}))^2)} dt$$

(27)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

i) ($i=m$. AND. $j=n$) 일때

$$\frac{(\epsilon_{i-J1} + \epsilon_{i+1-J1})}{2\epsilon_0(\epsilon_{i-J1} - \epsilon_{i+1-J1})} \sigma_{\tau mn} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (I_{mn} 1 - I_{mn} 2) \sigma_{\tau mn} = 0 \quad (29)$$

ii) ($i \neq m$. OR. $j \neq n$) 일때

$$\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^{Nm} (I_{mn} 1 - I_{mn} 2) \sigma_{\tau mn} = 0$$

$$\begin{matrix} i = J1+1, J1+2, \dots, J \\ j = 1, 2, \dots, Ni \end{matrix} \quad (30)$$

(29), (30)식을 (26)식의 형태로 나타내기 위해서 $S_{mn}(i, j)$ 을 각각 다음과 같이 정의한다.

i) ($i=m$. AND. $j=n$) 일때

$$S_{mn}(i, j) = \frac{(\epsilon_{i-J1} + \epsilon_{i+1-J1})}{2\epsilon_0(\epsilon_{i-J1} - \epsilon_{i+1-J1})} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (I_{mn} 1 - I_{mn} 2) \quad (31)$$

ii) ($i \neq m$. OR. $j \neq n$) 일때

$$S_{mn}(i, j) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} (I_{mn} 1 - I_{mn} 2)$$

$$\begin{matrix} i = J1+1, J1+2, \dots, J \\ j = 1, 2, \dots, Ni \end{matrix} \quad (32)$$

이제 (29), (30)식은 다음과 같이 하나의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sum_{m=1}^J \sum_{n=1}^{Nm} S_{mn}(i, j) \cdot \sigma_{\tau mn} = 0$$

$$\begin{matrix} i = J1+1, J1+2, \dots, J \\ j = 1, 2, \dots, Ni \end{matrix} \quad (33)$$

여기서 오른쪽 항은 i 와 j 의 값에 관계없이 항상 0의 값을 가진다. 따라서, (26)식과 (33)식을 결합하면 row와 column이 $N (= N_1 + N_2 + \dots + N_J)$ 인 정방행렬 (square matrix)을 이루게 되며, 이때 $S_{mn}(i, j)$ 이 각각의 matrix element가 된다. $S_{mn}(i, j)$ 을 계산하여 matrix element를 구한 후에 이 matrix를 풀면 쉽게 σ_{τ} 을 구할 수 있다. 그러므로 여기서 구한 σ_{τ} 을 (11)식에 대입하여 도체의 단위 길이에 대한 전하량 Q_i 을 구한 다음 (5), (6)식에 의해서 용량계수와 유도계수를 구할 수 있다.

IV. 계산 결과와 비교 검토

본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 보이기 위해서, 계산된 결과를 [2], [6], [8]에서의 결과와 비교해 보았다.

[6]은 W. T. Weeks가 1970년에 발표한 논문으로 일반적인 Green's function을 이용하여 얻어진 적분식을 least-square approximation을 사용해서 전하밀도를 구했다. 그러나 이 방법은 유전체층의 수에 따라 여러 형태의 Green's function이 요구되며, 적분식을 푸는 과정 또한 복잡하다. [2]는 C. P. Yuan이 1983년에 발표한 논문으로 [6]에서 얻

어진 적분식을 Even-Odd method를 사용해서 계산하였다. 이 방법 역시 위에서와 같은 문제점이 생긴다. [8]은 C. Wei가 1984년에 발표한 논문으로 처음으로 total 전하와 관련된 free-space Green's function을 이용하여 얻어진 적분식을 moment method를 사용하여 전하밀도를 계산하였다. 이 방법은 다층의 유전체가 존재하는 경우에도 쉽게 전하 밀도를 계산할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 C. Wei의 방법을 보다 개선하여 간단한 형태의 free-space Green's function을 유도하였으며, 이를 바탕으로 도체-유전체 경계면에 대한 관계식과 유전체-유전체 경계면에 대한 관계식을 유도하였고, 이 두 관계식을 이용해서 전하밀도를 구하기 위해서 각각의 경계면을 몇개의 subsection으로 나누어 이 구간 내에서는 전하밀도가 일정하다고 가정하였다. 특히 subsection을 나누는데 있어서 등간격으로 하지않고, 도체 표면에서의 전하밀도 분포를 고려하여 도체-유전체 경계면에서는 전하밀도가 큰 모서리쪽은 그 간격을 작게 하고 전하밀도가 작은 가운데 부분은 간격을 크게 하였다. 따라서 이웃한 구간과의 전하밀도의 차이를 작게 하여 줌으로서, 실제의 전하밀도 분포와 우리가 가정한 step-pulse 형태의 전하밀도와의 차이를 개선하였다. 또한 이를 바탕으로 실제 IC에서 발생할 수 있는 interconnection의 대표적인 5가지 경우에 대하여 캐패시턴스 값을 구해 보았다. 그림 4는 접지평면 위에 한층의 유전체 층이 있고, 그 위에 두개의 interconnection이 나란히 존재하는 경우이다. 그림 5는 두개의 interconnection이 서로 다른 높이에서 같은 유전체층 내부에 존재하는 경우이며, 그림 6은 서로 다른 유전체층 내부에 두개의 interconnection이 존재하는 경우이다.

그리고 그림 7은 아래 위 양면에 접지평면이 있고 그 내부를 채우고 있는 유전체층 안에 두개의 interconnection이 지나가는 경우이며, 그림 8은 interconnection의 단면이 직각이 아니라 사다리꼴 형태를 이루고 있는 경우에 해당한다. 각각의 경우에 있어서 본 논문에서 구한 결과를 기존의 방법으로 구한 결과와 비교를 함으로써 그 정확성을 충분히 입증할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 free-space Green's function으로부터 유도된 적분 방정식을 사용하여 interconnection line의 캐패시턴스 파라미터를 계산하였다. 계산한 캐패시턴스 파라미터 값들을 [2], [6], [8]의 값들과

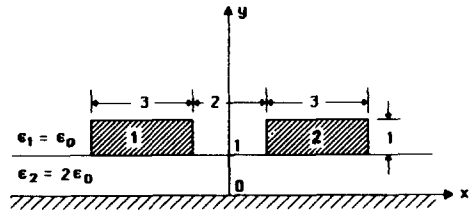


그림 4. 평행한 두 strip line (μm)
Fig. 4. Coupled microstrips.

표 1. 그림 4의 경우에 대한 용량계수와 유도계수 (F/m)

Table 1. The coefficient of capacitance and induction in Fig. 4.

	결 과	참고문헌 [8]	참고문헌 [6]
C ₁₁	0.9153 E-10	0.9165 E-10	0.9224 E-10
C ₁₂	-0.8209 E-11	-0.8220 E-11	-0.8504 E-11
C ₂₁	-0.8209 E-11	-0.8220 E-11	-0.8504 E-11
C ₂₂	0.9153 E-10	0.9165 E-10	0.9224 E-10

표 2. 그림 4의 경우에 대한 self 및 coupling 캐패시턴스 (F/m)

Table 2. The self and coupling capacitance in Fig. 4.

	결 과	참고문헌 [8]	참고문헌 [6]
C ₁₁	0.8332 E-10	0.8343 E-10	0.8374 E-10
C ₁₂	0.8209 E-11	0.8220 E-11	0.8504 E-11
C ₂₁	0.8209 E-11	0.8220 E-11	0.8504 E-11
C ₂₂	0.8333 E-10	0.8343 E-10	0.8374 E-10

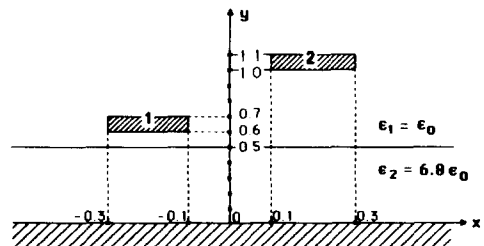


그림 5. 같은 유전체 층에 존재하는 두 도체 (μm)
Fig. 5. Two conductors in the same dielectric layers.

표 3. 그림 5의 경우에 대한 용량계수와 유도계수 (F/m)

Table 3. The coefficient of capacitance and induction in Fig. 5.

	결 과	참고문헌 [8]
C_{11}	0.3772 E-10	0.3720 E-10
C_{12}	-0.7095 E-11	-0.6889 E-11
C_{21}	-0.6941 E-11	-0.6889 E-11
C_{22}	0.2188 E-10	0.2169 E-10

표 4. 그림 5의 경우에 대한 self 및 coupling 캐패시턴스 (F/m)

Table 4. The self and coupling capacitance in Fig. 5.

	결 과	참고문헌 [8]
C_{11}	0.3066 E-10	0.3031 E-10
C_{12}	0.7095 E-11	0.6889 E-11
C_{21}	0.6941 E-11	0.6889 E-11
C_{22}	0.1494 E-10	0.1952 E-10

표 6. 그림 6의 경우에 대한 self 및 coupling 캐패시턴스 (F/m)

Table 6. The self and coupling capacitance in Fig. 6.

	결 과	참고문헌 [8]
C_{11}	0.3549 E-10	0.3495 E-10
C_{12}	0.1571 E-11	0.1562 E-11
C_{21}	0.1621 E-11	0.1562 E-11
C_{22}	0.1967 E-10	0.1943 E-10

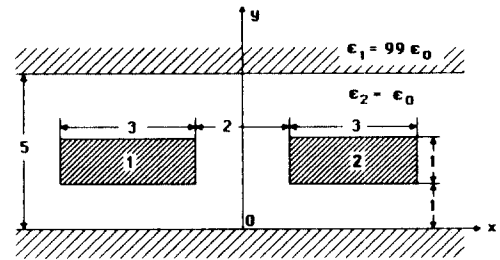


그림 7. 나란한 두 도체 평면 사이에 존재하는 strip line (μm)

Fig. 7. Coupled microstrips between conducting planes.

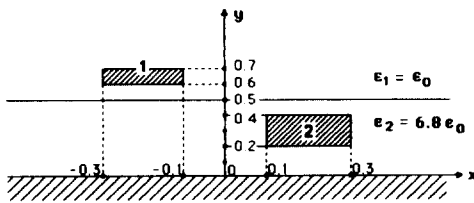


그림 6. 서로 다른 유전체 층에 존재하는 두 도체 (μm)

Fig. 6. Two conductors in two different dielectric layers.

표 7. 그림 7의 경우에 대한 용량계수와 유도계수 (F/m)

Table 7. The coefficient of capacitance and induction in Fig. 7.

	결 과	참고문헌 [8]	참고문헌 [6]
C_{11}	0.6256 E-10	0.6233 E-10	0.6307 E-10
C_{12}	-0.5717 E-11	-0.5931 E-11	-0.5866 E-11
C_{21}	-0.5717 E-11	-0.5931 E-11	-0.5866 E-11
C_{22}	0.6256 E-10	0.6233 E-10	0.6307 E-10

표 5. 그림 6의 경우에 대한 용량계수와 유도계수 (F/m)

Table 5. The coefficient of capacitance and induction in Fig. 6.

	결 과	참고문헌 [8]
C_{11}	0.3706 E-10	0.3651 E-10
C_{12}	-0.1571 E-11	-0.1562 E-11
C_{21}	-0.1621 E-11	-0.1562 E-11
C_{22}	0.2129 E-09	0.2099 E-09

표 8. 그림 7의 경우에 대한 self 및 coupling 캐패시턴스 (F/m)

Table 8. The self and coupling capacitance in Fig. 7.

	결 과	참고문헌 [8]	참고문헌 [6]
C_{11}	0.5684 E-10	0.5634 E-10	0.5720 E-10
C_{12}	0.5717 E-11	0.5931 E-11	0.5866 E-11
C_{21}	0.5717 E-11	0.5931 E-11	0.5866 E-11
C_{22}	0.5684 E-10	0.5634 E-10	0.5720 E-10

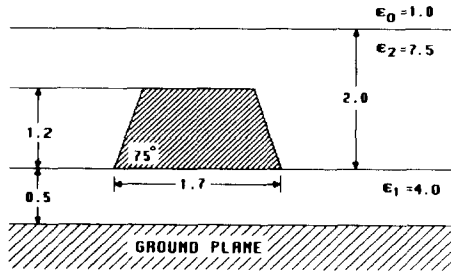


그림 8. 세개의 유전체 층이 존재하는 경우 (μm)
Fig. 8. A conductor in three dielectric layers.

표 9. 그림 8의 경우에 대한 캐패시턴스 (F/m)
Table 9. Capacitance in Fig. 8.

	결 과	참고문헌 [2]
c	0.3670 E-09	0.3598 E-09

비교해 본 결과, 아주 작은 오차를 보인다는 것을 알 수 있었다. Interconnection line의 수와 유전체층의 수가 주어지고 그에 대한 정확한 data 값을 알 수 있으면 간단하게 캐패시턴스 파라미터 값들을 구할 수 있으므로 이를 바탕으로 실제로 집적회로 설계시 자연 시간의 계산을 할 수 있기 때문에 회로 시뮬레이션에도 이용할 수 있으리라 기대 된다.

參 考 文 獻

- [1] N.G. Einspruch, VLSI Electronics Microstructure Science., vol. 12, Academic Press, 1985.
- [2] C.P. Yuan, "Modeling and extraction of interconnect parameters in very-large-scale integrated circuits," Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1983.
- [3] W.H. Chang, "Analytic IC metal-line capacitance formulas," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-24, pp. 608-611, Sept. 1976; and correction in vol. MTT-25, p. 712, Aug. 1977.
- [4] R.L.M. Dang and N. Shigyo, "Coupling capacitances for two-dimensional wires," *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-2, pp. 196-197, Aug. 1981.
- [5] Z. Pantic and R. Mittra, "Quasi-TEM analysis of microwave transmission lines by the Finite-Element Method," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-34, pp. 1096-1103, Nov. 1986.
- [6] W.T. Weeks, "Calculation of coefficients of capacitance of multiconductor transmission lines in the presence of a dielectric interface," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-18, pp. 35-43, Jan. 1970.
- [7] D.W. Kammler, "Calculation of characteristic admittances and coupling coefficients for strip transmission lines," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-16, pp. 925-937, Nov. 1968.
- [8] C. Wei, R. Harrington, L. Mautz, T. Sarkar, "Multiconductor lines in multilayers dielectric media," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-32, pp. 439-449, Apr. 1984.
- [9] V. Postoyalko, "Green's function treatment of edge singularities in the quasi-TEM analysis of microstrip," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-34, pp. 1092-1095, Nov. 1986.
- [10] Y.M. Hill, N.O. Reckard, D.R. Winner, "A general method for obtaining impedance and coupling characteristics of practical microstrip and triplicate transmission line configurations," *IBM J. Res. and Develop.*, vol. 13, pp. 314-322, May 1969.
- [11] A.E. Ruehli, P.A. Brennan, "Capacitance models for integrated circuit metallization wires," *IEEE J. of Solid-State Circuit*, vol. SC-10, pp. 530-536, Dec. 1975.
- [12] M.I. Elmasry, "Capacitance calculations in MOSFET VLSI," *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-3, pp. 6-7, Jan. 1982.
- [13] E. Yamashita, K. Atsuki, "Strip line with rectangular outer conductor and three dielectric layers," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-18, pp. 238-244, May 1970.
- [14] T.G. Bryant, J.A. Weiss, "Parameters of microstrip transmission lines and of coupled pairs of microstrip lines," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-16, pp. 1021-1027, Dec. 1968.
- [15] T. Sakurai, K. Tamaru, "Simple formulas for two- and three-dimensional capacitances," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-30, pp. 183-185, Feb. 1983.

- [16] C.E. Smith, R.S. Chang, "Microstrip transmission line with finite-width dielectric," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-28, pp. 90-94, Feb. 1978.
- [17] A.E. Ruehli, P.A. Brennan, "Survey of computer-aided electrical analysis of integrated circuit interconnections," *IBM J. Res. and Develop.*, vol. 23, pp. 626-639, Nov. 1979.
- [18] H.A. Wheeler, "Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-13, pp. 172-185, Mar. 1965.
- [19] S. Ramo, *Fields and Waves in Communication Electronics*, pp. 97-101, John Wiley Sons, 1965.
- [20] M.D. Greenberg, *Application of Green's functions in Science and Engineering*, Prentice-Hall, 1971.
- [21] K.C. Gupta, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, 1979. *

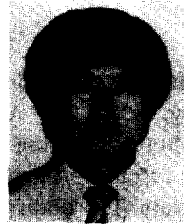
著 者 紹 介



金 漢 求 (正會員)

1962年 3月 16日生. 1985年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업 공학사학위 취득. 1988年 2月 한양대학교 대학원 전자공학과 졸업 공학석사학위 취득. 1988年 3月 ~ 현재 한양대학교 대학원 전자공학

과 박사과정. 주관심분야는 반도체 소자의 modeling simulation, circuit 설계, circuit parameter 추출등임.



郭 桂 達 (正會員)

1950年 2月 13日生. 1981年 ~ 현재 한양대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 GaAs SRAM의 설계와 이와 관련된 circuit extractor 개발, submicron device의 특성해

석을 위한 2-D 및 3-D simulator 개발, High-Speed 및 power용 반도체 소자의 개발 등임.