

다층유전체에서의 Interconnection Line에 대한 커패시턴스와 지연시간 계산방법에 관한 연구

(A Study on Delay Time and Capacitance Calculation for Interconnection Line in Multi-Dielectric Layer)

金 漢 求*, 郭 桂 達*

(Han Gu Kim and Kae Dal Kwack)

要 約

본 논문에서는 다층유전체 구조를 갖는 VLSI interconnection line에 대한 커패시턴스를 계산하기 위한 방법을 제안한다. 이 방법은 단일 유전체 구조에서 개발한 3차원 직접 적분방법을 확장한 것이다. 다층유전체에 의한 영향은 Green's function을 수정하는 대신에 경계조건을 추가함으로써 고려하였다. 여기서 사용한 경계조건은 line 표면에서는 전위에 대한 식을 사용하였고, 유전체 경계면에서는 전계에 대한 식을 사용하였다. 이 방법으로부터 얻어진 커패시턴스를 이용하여 다층유전체 구조에서의 interconnection line에 대한 RC 지연시간의 값을 구했다. 이때 사용한 interconnection 물질은 Al과 WSi₂이다.

Abstract

This paper propose how to calculate the capacitance for VLSI interconnection lines in multi-dielectric layer. The proposed method is a expansive form of 3-dimensional direct intergral method developed in single-dielectric layer. We took into consideration the effect of multi-dielectric layer by using additional boundary condition instead of modified Green's function. It is used the potential equations in line surface and the electric field equations in dielectric interface as the boundary condition. RC delay time for interconnection line of multi-dielectric layer is obtained from the calculated capacitance value. At this time, we are used Al and WSi₂ as interconnection materials.

I. 서 론

집적회로(IC) 내에서의 지연시간(delay time)은 소자에 의한 성분과 소자간의 interconnection line에 의한 성분으로 분류할 수 있는데, 집적도가 낮을 때에는 소자에 의한 지연이 주도적으로 되었지만, 현재와

같이 집적도가 높은 회로에서는 interconnection line에 의한 지연현상이 큰 영향을 미치고 있다. 따라서, 회로내의 interconnection line에 의한 지연시간을 계산해 내는 문제가 중요하게 되었고, 이에 대한 연구가 광범위하게 이루어지고 있다.^{1)~5)} 회로에서 interconnection line의 길이가 길어지게 되면, 저항과 커패시턴스가 동시에 커지게 되는데 이는 지연시간의 증가를 의미한다. 또한, 집적회로 내에서 interconnection line들은 단일 유전체층 내에 배치되기 보다는 오히려 여러층의 서로 다른 유전체층에 배치되고 있다. 이러

*正會員, 漢陽大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Hanyang Univ.)

接受日字: 1992年 5月 11日

한 배치는 주로 커패시턴스값에 영향을 미치고 있기 때문에, 다층유전체 구조를 갖는 interconnection line에 대한 커패시턴스 계산이 필요하다. 다층 유전체 구조를 갖는 interconnection line에 대한 커패시턴스값을 구하기 위해서 초기에는 해석적인 방법^[6]이나 2차원 수치해석 방법^[7, 8]이 사용되었지만, 선폭(line width)이 1um 이하로 내려감에 따라 fringing field에 의한 영향을 보다 정확하게 고려할 수 있는 3차원 수치해석 방법^[9, 10]이 많이 연구되고 있다. 본 저자는 이미 단일 유전체 구조에서 2차원 방법과 3차원 방법에 의한 커패시턴스를 비교하여, fringing field 성분이 미치는 정도를 [9]를 통해서 제시하였다. 따라서, 본 논문에서는 다층유전체 구조를 갖는 interconnection line에 대한 커패시턴스를 계산하는 데 있어서, [9]에서 제시한 3차원 직접 적분방법을 확장한 새로운 계산방법을 제시하고, 이 방법을 사용하여 커패시턴스를 계산하였다. 또한 계산결과들은 평행판 방법과 Yuan^[6]에 의해 제시된 방법과 비교를 하여 그 타당성을 입증한 후, interconnection line을 구성하는 물질이 Al과 WSi₂인 경우에 대하여 지연시간을 구하였다.

II. Interconnection Line에서의 지연시간과 저항

1. 지연시간(Delay Time)

현재와 같이 interconnection line에서의 지연시간을 무시할 수 없는 상황에서, 집적회로의 지연시간을 계산하기 위해서는 반드시 interconnection line에 의한 RC 지연시간을 고려하여야만 한다. 따라서 회로에서 고려되는 전체 지연시간은 구동 트랜지스터에 의한 성분과 interconnection line에 의한 성분을 합한 것으로서, 이에 는 50% 지연과 90% 지연이라는 두가지가 있다. 50% 지연이란 입력값의 50% 지점에서 출력값의 50% 지점까지의 시간간격을 의미하고, 이에 대한 계산식은 다음과 같다.^[5]

$$T_{50\%} = 0.4R_{int}C_{int} + 0.7(R_{tr}C_{int} + R_{tr}C_L + R_{int}C_L) \\ \approx (0.4R_{int} + 0.7R_{tr})C_{int} \text{ for } C_L \ll C_{int} \quad (1)$$

여기서, R_{int} , C_{int} , R_{tr} , C_L 는 각각 다음을 의미한다.

R_{int} : interconnection line의 저항

C_{int} : interconnection line의 커패시턴스

R_{tr} : 트랜지스터의 저항 (transistor resistance)

C_L : 출력단의 커패시턴스 (load capacitance)

한편, 90% 지연이란 최종값의 0%에서 90%까지 증

가하는데 요구되는 시간을 의미하고, 이에 대한 계산식은 다음과 같다.^[5]

$$T_{90\%} = 1.0R_{int}C_{int} + 2.3(R_{tr}C_{int} + R_{tr}C_L + R_{int}C_L) \\ \approx (1.0R_{int} + 2.3R_{tr})C_{int} \text{ for } C_L \ll C_{int} \quad (2)$$

이러한 interconnection line에서의 지연시간을 계산하기 위한 모델을 그림 1에 나타내었다. (1),(2)식에서 트랜지스터에 의한 가중치가 interconnection line에 의한 가중치보다 훨씬 크기 때문에, interconnection line의 길이가 짧을 경우에는 interconnection line의 저항 R_{int} 가 트랜지스터 저항 R_{tr} 보다 매우 작은 값을 가지기 때문에, interconnection line에 의한 지연시간을 무시할 수 있다. 그러나, 현재와 같은 집적도를 갖는 회로에서는 하나의 신호를 전달하기 위해서 필요한 line의 길이가 보통 1cm (1000um) 이상이 될 정도로 길어짐으로 인해서, 저항 R_{int} 와 R_{tr} 이 비슷한 값을 가지게 되고, 커패시턴스 C_{int} 가 C_L 을 오히려 능가하는 상황이기 때문에, interconnection line에 의한 지연시간 성분을 더이상 무시할 수 없게 되었다.^[5] 본 논문에서는 Al, WSi₂을 interconnection line으로 사용하였을 때, 구동 트랜지스터를 제외한 순수한 interconnection line에서의 지연시간($R_{int}C_{int}$)을 계산하여 비교하였다.

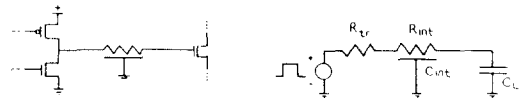


그림 1. Interconnection line의 지연 모델

Fig. 1. Delay model of interconnection line.

2. 저항의 계산

집적회로 내에서의 저항은 구동 트랜지스터에 의한 저항과 interconnection에 의한 저항의 두가지로 구분된다. 먼저 구동 트랜지스터(MOS Tr.)의 on 저항에 대한 식은 다음과 같다.^[5] (1차 근사식)

$$R_{tr} \approx \frac{L_{tr} W_{tr}}{\mu C_{ox} \times V_{DD}} \quad (3)$$

여기서, L_{tr} 과 W_{tr} 는 각각 트랜지스터 gate의 길이와 폭을 나타내고, μ 는 캐리어(carrier)의 이동도, C_{ox} 는 gate에 의한 커패시턴스를, V_{DD} 는 drain 전압

을 나타낸다. Interconnection line의 저항에 대한 식은 다음과 같다.

$$R_{int} \approx \rho \frac{l_{int}}{W_{int} \times T_{int}} \quad (4)$$

여기서, ρ 는 interconnection line을 이루고 있는 물질의 저항률(resistivity)을 나타내고, W_{int} (or W), T_{int} (or T), l_{int} (or L)는 각각 line의 폭과 두께 및 길이를 나타낸다. Line의 저항은 물질의 종류와 폭, 두께, 길이 등을 알 수 있으면, (3)식을 사용하여 쉽게 구할 수 있다. 본 논문에서 사용한 Al과 WSi_2 의 저항률 ρ 는 각각 $3.0E-2[\Omega \cdot \mu m]$, $12.5E-2[\Omega \cdot \mu m]$ 로 두고 계산하였다. 이때, line의 두께를 $T=0.5\mu m$ 로 일정하게 두고, 폭을 $W=0.5, 1.0, 1.5\mu m$ 로 변화시켰을 때의 단위길이($L=1.0\mu m$)에 대한 저항값을 표1에 나타내었다. 이 세가지 경우에 대하여 각각 커패시턴스를 구한 후 RC 지연시간을 계산하고자 한다.

표 1. 단위길이 ($l_{int} = 1.0\mu m$)에 대한 Al과 WSi_2 의 저항값 비교

Table 1. Comparison of unit length resistance in Al and WSi_2 .

	Al $\rho=3.0E-2[\Omega \cdot \mu m]$	WSi_2 $\rho=12.5E-2[\Omega \cdot \mu m]$
T=0.5 μm W=0.5 μm	0.12 $\Omega / \mu m$	0.50 $\Omega / \mu m$
T=0.5 μm W=1.0 μm	0.06 $\Omega / \mu m$	0.25 $\Omega / \mu m$
T=0.5 μm W=1.5 μm	0.04 $\Omega / \mu m$	0.17 $\Omega / \mu m$

III. 다층 유전체에서의 커패시턴스의 계산

1. 기본 이론

Interconnection line에 대한 커패시턴스 계산은 수치해석적인 방법,^[7-10] 해석적인 방법^[6]을 사용하여 많은 연구가 행해져 오고 있다. 가장 최근에 연구된 3차원 Green's function을 바탕으로 한 적분방법을 사용하는 것이 보다 쉬우면서도 정확하게 커패시턴스 값을 구하는 데 이용되고 있다. Ning^[10]이 사용한 Fourier 적분에 의한 방법보다는 [9]에서 제시한 직접 적분법을 사용하는 것이 편리하지만, [9]의 방법은 단일 유전체 층에 대해서만 적용할 수 있다. 본 논문에서는 보

다 일반적인 구조를 갖는 다층의 유전체에 대해서도 직접 적분법을 적용할 수 있도록 [9]의 방법을 확장하고자 한다. 유전체층의 수가 늘어나게 되면, 경계조건이 추가된다. 즉, 단일유전체층에서의 경계조건은 interconnection line 표면에서의 전위에 대한 값만 사용되었지만, 다층유전체층에서의 경계조건은 interconnection line 표면에서의 전위뿐만 아니라 유전체-유전체 경계면에서의 전계의 연속에 대한 조건이 추가된다. 이러한 문제를 해결하는 방법에는 두가지가 있는데, 첫번째 방법은 Weeks^[7] 등이 사용한 방법으로 유전체층의 수에 의한 영향을 Green's function의 식의 변화를 통해서 해결하였다. 이는 유전체층의 수가 J일때 Green's function의 수는 J_2 이 되기 때문에, 유전체층이 2개까지만 사용이 가능하고 그 이상에서는 사용하기가 어렵다. 두번째 방법은 Wei^[11]에 의해 제시된 방법으로 Green's function의 형을 변화시키지 않고서 문제를 해결하는 방법이다. 이때 다층 유전체층의 영향은 전하밀도에 대한 개념을 확장시키고 경계조건을 추가를 통해서 해결한다. 즉, 전하밀도는 도체 표면에 존재하는 자유전하 외에 유전체에서의 분극전하(displacement charge) 개념을 도입하여, 도체와 유전체경계면에서는 자유전하와 분극전하가 함께 존재하고, 유전체-유전체 경계면에서는 분극전하만이 존재한다고 보고 이 두 종류의 전하를 합한 total 전하를 구하게 된다. 이를 구하기 위해서는 도체-유전체 경계면에서는 전위에 대한 경계조건을 사용하고, 유전체-유전체 경계면에서는 전계의 연속성질을 사용하여 전하밀도를 구한다.

2. 도체-유전체 경계면에서의 경계조건

이 경계조건은 도체 표면에서의 전위와 전하밀도에 대한 조건이기 때문에, 이를 구하기 위해서는 먼저 적분방법의 기본식인 Green's function의 형을 알아야 한다. 본 논문에서 사용하는 3차원 Green's function의 형태는 다음과 같다.^[9]

$$G(r|r') = G(x, y, z|x', y', z') = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{1/2}} - \frac{1}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2]^{1/2}} \right\} \quad (5)$$

위 식은 점 $r'(x', y', z')$ 에 단위전하가 존재할 때, 이 전하에 의하여 점 $r(x, y, z)$ 에 주어지는 전위의 크기

를 나타낸다. 도체표면과 유전체 경계면을 미소면적소로 나누어 주고, 각 미소면적소에는 $\sigma_{Ts}[C/cm^2]$ 라는 전하밀도를 갖는 전하들이 존재하고 있다면, 도체표면의 임의의 한 점 $r(x, y, z)$ 에서의 전위는 모든 면적소에 의해서 주어지는 값들을 합한 것이기 때문에 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, z) &= \sum_{i=1}^N \int_{\Delta S_i} G(x, y, z | x', y', z') \cdot \sigma_{Ts}(r') dS_i \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Delta S_i} \left\{ \frac{1}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right\} \sigma_{Ts}(r') dS_i \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, N : 도체-유전체 경계면에서의 미소면적소의 수

+ 유전체-유전체 경계면에서의 미소면적소의 수

$\sigma_{Ts}(r')$: 점 $r'(x', y', z')$ 에 위치한 미소면적소에서의 total 전하에 의한 표면전하밀도

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_{Ts} = \sigma_{Fs} + \sigma_{Ds} \text{ (도체-유전체 경계면에서)} \\ \sigma_{Ts} = \sigma_{Ds} \text{ (유전체-유전체 경계면에서)} \\ \sigma_{Fs} : \text{자유전하에 의한 표면전하밀도} \\ \sigma_{Ds} : \text{분극전하에 의한 표면전하밀도} \end{array} \right]$$

3. 유전체-유전체 경계면에서의 경계조건

유전체-유전체 경계면에서는 변위벡터(displacement vector) $D(= \epsilon E)$ 의 수직성분이 연속이 되는 데, 먼저 (6)식을 미분하여 전계에 대한 식을 얻는다. 즉,

$$\begin{aligned} E(r, r') &= -\nabla \Phi(r, r') \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Delta S_i} \sigma_{Ts}(r') \left\{ \frac{(x-x')u_x + (y-y')u_y + (z-z')u_z}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(x-x')u_x + (y-y')u_y + (z+z')u_z}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right\} dS_i \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 u_x, u_y, u_z 는 각각 x-, y-, z-방향의 단위 벡터이다.

유전체-유전체 경계면에서는 (7)식에 의해서 주어지는 전계이외에, 경계면에 존재하는 분극전하에 의한 전계가 부가적으로 주어지기 때문에 이에 대한 크기를

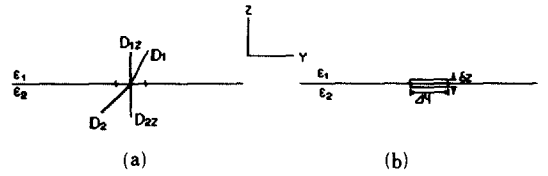


그림 2. 유전체 경계면에서의 계산 모델
Fig. 2. Calculating model at dielectric interface.

구하기 위해서, Gauss 법칙을 적용한다. 그림 2(b)와 같이 경계면의 미소면적소에 대하여 Gauss 법칙을 적용한다.

$$\int D \cdot dS = \int \rho_s dS = \sigma_{Ts} \Delta x \Delta y \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{좌변} &= \int D \cdot dS = \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} \int_{-\Delta y/2}^{\Delta y/2} \\ &\quad \left[(D_{1z} u_z) \cdot (dx dy u_z) + (-D_{2z} u_z) \cdot (-dx dy u_z) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= D_{1z} \Delta x \Delta y + D_{2z} \Delta x \Delta y \\ &= 2D_z \Delta x \Delta y \quad (D_{1z} = D_{2z}) \end{aligned}$$

$$D_z = \epsilon_0 E_z = \sigma_{Ts} / 2$$

$$E_z = \frac{\sigma_{Ts}}{2\epsilon_0} \quad (\text{경계면 위·아래로 같은 크기의 전계}) \quad (9)$$

(7)식과 (9)식을 사용하여 유전체 경계면 위·아래에서의 전체 전계성분을 구하면 다음과 같다.

(경계면 위)

$$E_{1z} = (7)식 \cdot u_z + (9)식$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Delta S_i} \sigma_{Ts}(r') \left\{ \frac{(z-z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(z+z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right\} dS_i + \frac{\sigma_{Ts}(r')}{2\epsilon_0} \end{aligned} \quad (10)$$

(경계면 아래)

$$E_{2z} = (7)식 \cdot u_z - (9)식$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Delta S_i} \sigma_{Ts}(r') \left\{ \frac{(z-z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(z+z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right\} dS_i - \frac{\sigma_{Ts}(r')}{2\epsilon_0} \end{aligned} \quad (11)$$

또한 유전체 경계면에서의 변위 벡터 D 의 연속성질에 의해서 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 E_{1z} &= \epsilon_2 E_{2z} \\ \epsilon_1 E_{1t} &= \epsilon_2 E_{2t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_1 & \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \Delta S_i \sigma_{Ts}(r') \left[\frac{(z-z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{(z+z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right] dS_i + \frac{\sigma_{Ts}(r')}{2\epsilon_0} \right\} \\ &= \epsilon_2 \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \Delta S_i \sigma_{Ts}(r') \left[\frac{(z-z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - \frac{(z+z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right] dS_i - \frac{\sigma_{Ts}(r')}{2\epsilon_0} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

(12)식을 정리하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\epsilon_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)} \sigma_{Ts} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \\ \sum_{i=1}^N \int \Delta S_i \sigma_{Ts}(r') \left[\frac{(z-z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z-z')^2]^{3/2}} \right. \\ \left. - \frac{(z+z')}{[(x-x')^2+(y-y')^2+(z+z')^2]^{3/2}} \right] dS_i = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

이 (13)식이 유전체 경계면에서의 경계조건에 대한 식이 된다.

4. 행렬의 구성과 해법

도체-유전체 경계면에 대한식인 (6)식과 유전체-유전체 경계면에 대한식인 (13)식을 결합하면, N 개의 미소면적소에서의 전하밀도 σ_{Ts} 를 구하는 연립방정식을 형성한다. 이러한 연립방정식을 행렬의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} & \cdots & A_{1,N} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} & \cdots & A_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N,1} & A_{N,2} & A_{N,3} & \cdots & A_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{Ts}(1) \\ \sigma_{Ts}(2) \\ \vdots \\ \sigma_{Ts}(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{(1)} \\ \Phi_{(2)} \\ \vdots \\ \Phi_{(N)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서, N_1 은 도체표면에서 미소면적소의 수, N_2 은 유전체 경계면에서 미소면적소의 수, $N(=N_1+N_2)$ 은 미소면적소의 전체 수를 나타낸다. (14)식을 $A \cdot X=B$ 라고 정의하면, 계수행렬 A 는 정방행렬이 되는 데, 이는 미소면적소의 크기와 좌표를 알고 있다면 바로 구할 수 있는 값이다. 행렬 B 는 각 미소면적소에 대한 초기값으로, 도체표면에서는 전위에 해당하는 값으로 1 또는 0의 값을 가지고, 유전체 경계면에서는 모두 0의 값을 갖는다. 따라서, 행렬 X 는 행렬 A 와 B 로부터 구할 수 있다. 이러한 과정을 통해서 구한 미소면적소에서의 전하밀도는 total 전하이기 때문에, 다음의 과정을 통하여 도체면에서의 자유전하밀도 σ_{fs} 를 구하게 된다. 도체표면에서의 전계는 표면에 대하여 수직방향으로 외부를 향한다. 즉, 도체내부에서의 전계는 0이다. 따라서, Gauss 법칙을 적용하여 도체표면의 미소면적소에 존재하는 자유전하밀도는 다음관계식을 사용하여 구한다.

$$\begin{aligned} \sigma_{Ts} &= \epsilon_0 \cdot E_{\perp} \\ \sigma_{fs} &= \epsilon \cdot E_{\perp} \\ \sigma_{fs} &= \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \sigma_{Ts} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 관계식으로부터 자유전하를 구한 후, [9]에서 사용한 방법을 이용하여 interconnection line에서의 self-커패시턴스와 coupling-커패시턴스를 구할 수 있다. 또한, 이들 두 커패시턴스 성분을 합하게 되면 total 커패시턴스가 된다.

5. 계수행렬의 계산방법

(14)식에서 계수 행렬 $A_{N \times N}$ 는 다음과 같이 계산한다.

5.1 $m=1, 2, \dots, N_1$ 이고 $i=1, 2, \dots, N$ 인 경우 (m : field point, i : source point)

이 경우의 적분계산법은 [9]에서 상세하게 설명하고 있다.

5.2 $m=N_1+1, N_1+2, \dots, N$ 이고 $i=1, 2, \dots, N$ 인 경우

1) $m \neq i$ 인 경우

$$A_{m,i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} [A1(m,i) - A2(m,i)] \quad (16)$$

i) source point가 line의 아래·윗면 또는 유전체 경계면인 경우

$$A1(m, i) = \begin{cases} 0 & (z_{mi}=0) \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{z_{mi} | B_2 |}{B_2 | z_{mi} |} \left[\tan^{-1} \frac{z_{mi} | \tan(\theta/2) |}{C_2 - B_2} \right. \right. \\ \left. \left. - \tan^{-1} \frac{z_{mi} | \tan(\theta/2) |}{C_2 + B_2} \right] \right] & \begin{matrix} \theta = \theta_2 \\ \theta = \theta_1 \end{matrix} \\ - \frac{z_{mi} | B_2 |}{B_2 | z_{mi} |} \left[\tan^{-1} \frac{z_{mi} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 - B_1} \right. \\ \left. - \tan^{-1} \frac{z_{mi} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 + B_1} \right] & \begin{matrix} \theta' = \theta_4 \\ \theta' = \theta_3 \end{matrix} \end{cases}$$

여기서, $x_{mi} = x_m - x_i$, $y_{mi} = y_m - y_i$, $z_{mi} = z_m - z_i$

$$\begin{aligned} A_1 &= -\Delta x / 2 - x_{mi}, & A_2 &= \Delta x / 2 - x_{mi} \\ B_1 &= -\Delta y / 2 - y_{mi}, & B_2 &= \Delta y / 2 - y_{mi} \\ C_1 &= [z_{mi}^2 + B_2^2]^{1/2}, & C_2 &= [z_{mi}^2 + B_2^2]^{1/2} \\ \theta_1 &= \tan^{-1}[A_1 / C_2], & \theta_2 &= \tan^{-1}[A_2 / C_2], \\ \theta_3 &= \tan^{-1}[A_1 / C_1], & \theta_4 &= \tan^{-1}[A_2 / C_1], \end{aligned}$$

$$A2(m, i) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{z_{mj} | B_2 |}{B_2 | z_{mj} |} \left[\tan^{-1} \frac{z_{mj} | \tan(\theta/2) |}{C_2 - B_2} \right. \right. \\ \left. \left. - \tan^{-1} \frac{z_{mj} | \tan(\theta/2) |}{C_2 + B_2} \right] \right] & \begin{matrix} \theta = \theta_2 \\ \theta = \theta_1 \end{matrix} \\ - \frac{z_{mj} | B_2 |}{B_2 | z_{mj} |} \left[\tan^{-1} \frac{z_{mj} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 - B_1} \right. \\ \left. - \tan^{-1} \frac{z_{mj} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 + B_1} \right] & \begin{matrix} \theta' = \theta_4 \\ \theta' = \theta_3 \end{matrix} \end{cases}$$

여기서, $x_{mi} = x_m - x_i$, $y_{mi} = y_m - y_i$, $z_{mj} = z_m + z_i$

$$\begin{aligned} A_1 &= -\Delta x / 2 - x_{mi}, & A_2 &= \Delta x / 2 - x_{mi} \\ B_1 &= -\Delta y / 2 - y_{mi}, & B_2 &= \Delta y / 2 - y_{mi} \\ C_1 &= [z_{mj}^2 + B_1^2]^{1/2}, & C_2 &= [z_{mj}^2 + B_2^2]^{1/2} \\ \theta_1 &= \tan^{-1}[A_1 / C_2], & \theta_2 &= \tan^{-1}[A_2 / C_2], \\ \theta_3 &= \tan^{-1}[A_1 / C_1], & \theta_4 &= \tan^{-1}[A_2 / C_1], \end{aligned}$$

ii) source pint가 line의 옆면인 경우

$$A1(m, i) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{z_{mi} | B_2 |}{B_2 | y_{mi} |} \left[\tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta/2) |}{C_2 - B_2} \right. \right. \\ \left. \left. - \tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta/2) |}{C_2 + B_2} \right] \right] & \begin{matrix} \theta = \theta_2 \\ \theta = \theta_1 \end{matrix} \\ - \frac{z_{mi} | B_1 |}{B_1 | y_{mi} |} \left[\tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 - B_1} \right. \\ \left. - \tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 + B_1} \right] & \begin{matrix} \theta' = \theta_4 \\ \theta' = \theta_3 \end{matrix} \end{cases}$$

여기서, $x_{mi} = x_m - x_i$, $y_{mi} = y_m - y_i$, $z_{mi} = z_m - z_i$

$$A_1 = -\Delta x / 2 - x_{mi}, \quad A_2 = \Delta x / 2 - x_{mi}$$

$$\begin{aligned} B_1 &= -\Delta z / 2 - z_{mi}, & B_2 &= \Delta z / 2 - z_{mi} \\ C_1 &= [y_{mi}^2 + B_1^2]^{1/2}, & C_2 &= [y_{mi}^2 + B_2^2]^{1/2} \\ \theta_1 &= \tan^{-1}[A_1 / C_2], & \theta_2 &= \tan^{-1}[A_2 / C_2], \\ \theta_3 &= \tan^{-1}[A_1 / C_1], & \theta_4 &= \tan^{-1}[A_2 / C_1], \end{aligned}$$

$$A1(m, i) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{z_{mj} | B_2 |}{B_2 | y_{mi} |} \left[\tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta/2) |}{C_2 - B_2} \right. \right. \\ \left. \left. - \tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta/2) |}{C_2 + B_2} \right] \right] & \begin{matrix} \theta = \theta_2 \\ \theta = \theta_1 \end{matrix} \\ - \frac{z_{mj} | B_1 |}{B_1 | y_{mi} |} \left[\tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 - B_1} \right. \\ \left. - \tan^{-1} \frac{y_{mi} | \tan(\theta'/2) |}{C_1 + B_1} \right] & \begin{matrix} \theta' = \theta_4 \\ \theta' = \theta_3 \end{matrix} \end{cases}$$

여기서, $x_{mi} = x_m - x_i$, $y_{mi} = y_m - y_i$, $z_{mj} = z_m + z_i$

$$\begin{aligned} A_1 &= -\Delta x / 2 - x_{mi}, & A_2 &= \Delta x / 2 - x_{mi} \\ B_1 &= -\Delta z / 2 - z_{mj}, & B_2 &= \Delta z / 2 - z_{mj} \\ C_1 &= [y_{mi}^2 + B_1^2]^{1/2}, & C_2 &= [y_{mi}^2 + B_2^2]^{1/2} \\ \theta_1 &= \tan^{-1}[A_1 / C_2], & \theta_2 &= \tan^{-1}[A_2 / C_2], \\ \theta_3 &= \tan^{-1}[A_1 / C_1], & \theta_4 &= \tan^{-1}[A_2 / C_1], \end{aligned}$$

2) $m=i$ 인 경우

$$A_{m,i} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\epsilon_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)} + (16) \text{ 식} \quad (17)$$

IV. 결과 및 검토

본 논문에서는 그림3에 나타낸 형태와 같은 interconnection 구조에 대하여 line의 길이에 따른 total 커패시턴스값을 계산한 후, RC delay time을 구하였다. 그림 3의 (a), (b), (c), (d)에서의 interconnection들은 모두 두개의 서로 다른 유전체 물질에 의해 둘러싸여 있다. 커패시턴스값은 line 주변의 유전체 물질의 영향을 직접적으로 받는 값이기 때문에, 이에 대한 영향을 고려하여 계산하여야 한다. 비교를 위해서 사용한 계산값은 평행판 계산법에 의한 결과와 Yuan⁽¹²⁾의 계산법에 의한 결과이다. 이때 평행판 계산방법과 Yuan의 계산방법은 interconnection이 하나만 존재할 경우에만 적용할 수 있는 방법들이다. 표 2는 그림 3의 4가지 형태에 있어서, $W=0.5, 1.0, 1.5\mu\text{m}$ 일 때 단위길이($L=1.0\mu\text{m}$)에 대한 total 커패시턴스값을 나타내고 있다.

계산은 모두 line의 두께를 $0.5\mu\text{m}$, 길이를 $1.0\mu\text{m}$ 로 고정한 상태에서 폭을 변화시키면서 구한 값이다. 그림

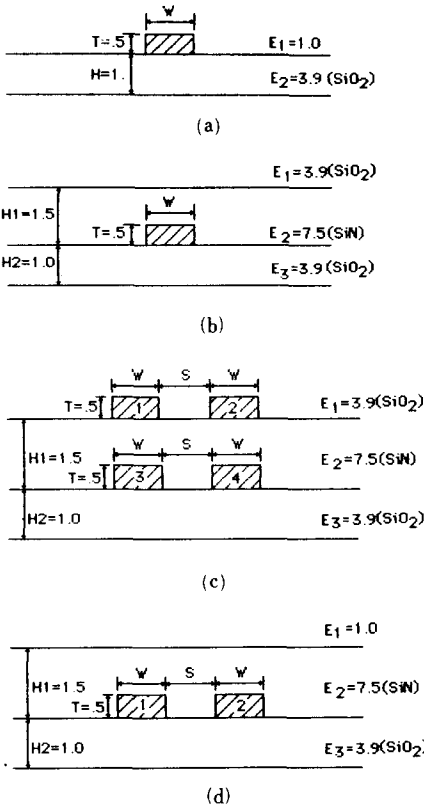


그림 3. Interconnection line의 배치 형태
Fig. 3. Layout type of interconnection line.

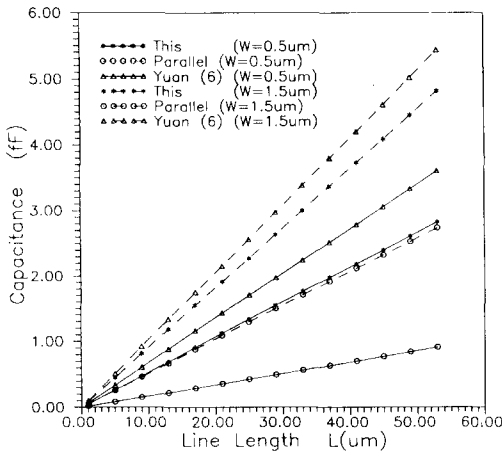


그림 4. 그림 3. (a)에서 line의 길이에 따른 total 커패시턴스의 변화
Fig. 4. Total capacitance with line length variation in Fig. 3. (a)

표 2. 그림3의 각각의 경우에 대하여 단위길이에 대한 total 커패시턴스

Table 2. Total capacitance for unit length in cases Fig. 3.

Fig. 3	T=0.5um, L=1.0um			
	W=0.5um	W=1.0um	W=1.5um	
(a)	C_{int}	0.0534 [fF]	0.0713 [fF]	0.0909 [fF]
(b)	C_{int}	0.1418 [fF]	0.1614 [fF]	0.1798 [fF]
(c)	C_{1int} $=C_{2int}$	0.2117 [fF]	0.1921 [fF]	0.1968 [fF]
(d)	C_{1int} $=C_{2int}$	0.1632 [fF]	0.1773 [fF]	0.2069 [fF]
	C_{3int} $=C_{4int}$	0.2434 [fF]	0.2576 [fF]	0.2973 [fF]

4는 (a)의 구조에 대하여 대하여 total 커패시턴스를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 평행판식에 의한 값은 계산값과 큰 차이를 보이고 있다. Yuan에 의한 결과는 정확성을 가지고 있지만, 수치해석 결과와는 역시 차이를 보이고 있다. 그림 5는 (a)의 구조에 대하여 RC 지연시간을 나타내고 있는데, WSi₂ 경우가 Al 경우보다 값이 큰 것은 표 1에서 알 수 있는 것처럼 저항이 보다 크기 때문이고, 같은 물질인 경우 line의 폭이 좁은 경우가 지연시간이 큰 것은 line의 폭의 감소에 의한 영향이 커패시턴스값의 감소를 가져오는 이상으로 저항의 증가를 초래하기 때문이다. 그림 6은 (b)의 구조에 대하여 total 커패시턴스를 나타내고 있는데, 이때 Yuan의 결과와 수치해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있는데, 이는 Yuan의 계산식이 주로 이와같은 유전체 구조에서 사용할 수 있도록 만들어졌다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 (b)의 구조에 대하여 RC 지연시간을 나타내고 있는데, 그림5의 경우와 마찬가지로 사실을 알 수 있다. 그림8은 (c)의 구조에 대하여 line 1, 2에서의 total 커패시턴스를 보여준다.

이 경우에 대하여는 해석적인 공식이 없기 때문에 본 논문에서의 수치해석 결과만을 제시하였고, 계산과정에서 line의 간격 S는 line의 폭과 같은 값으로 두고 계산하였다. (a), (b)의 경우와 달리 폭과 간격이 동시에 변하면, line 상호간의 coupling 커패시턴스 성분의 영향을 받아 total 커패시턴스값은 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 그림 9는 (c)의 구조에 대한 RC 지연시간을 보여주고 있는데, line의 폭이 0.5, 1.0, 1.5um인 경우 커패시턴스값은 거의 비슷한 값을 갖지만 저항의 큰 차이로 인해 지연시간의 값이 크게 변함

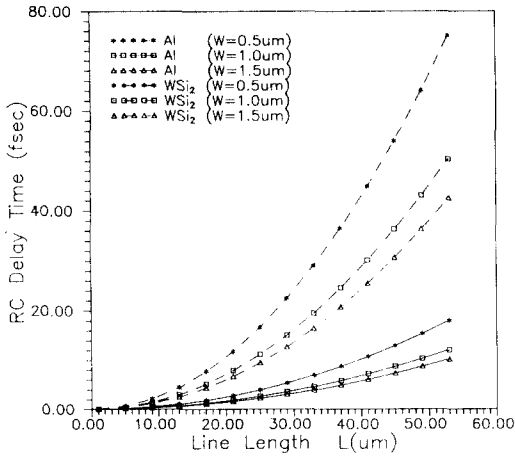


그림 5. 그림 3. (a)에서 line의 길이에 따른 RC 지연시간의 변화

Fig. 5. RC delay time with line length variation in Fig. 3. (a)

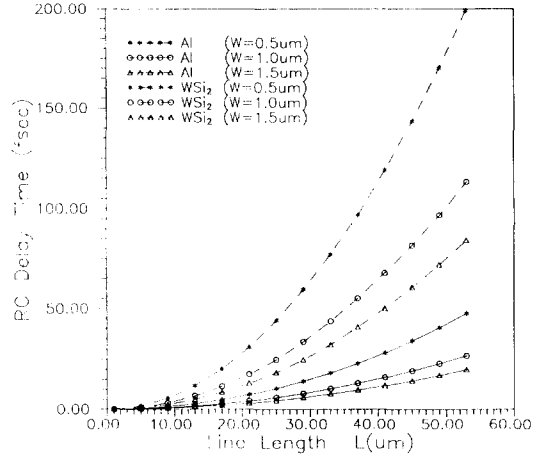


그림 7. 그림 3. (b)에서 line의 길이에 따른 RC 지연시간의 변화

Fig. 7. RC delay time with line length variation in Fig. 3. (b)

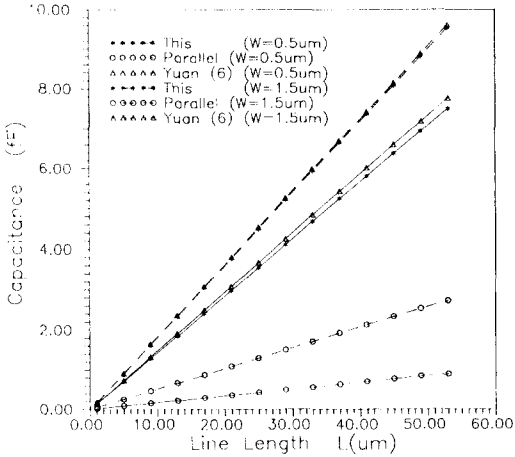


그림 6. 그림 3. (b)에서 line의 길이에 따른 total 커패시턴스의 변화

Fig. 6. Total capacitance with line length variation in Fig. 3. (b)

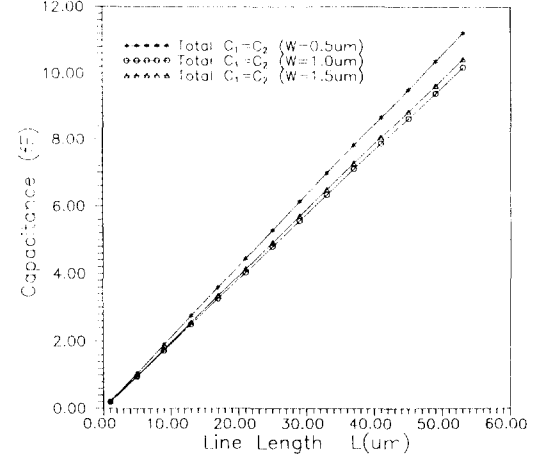


그림 8. 그림 3. (c)에서 line의 길이에 따른 total 커패시턴스의 변화

Fig. 8. Total capacitance with line length variation in Fig. 3. (c)

알 수 있다. 그림 10은 line이 4개가 상하로 배치되어 있는 (d)의 구조에 대한 total 커패시턴스를 나타내고 있는데, 아래에 있는 line의 경우가 값이 더 큰것을 알 수 있다. 그림 11은 RC 지연시간을 나타내는 데, 폭이 같을 때 아래에 있는 line이 지연시간이 더 큰것은 커패시턴스가 크기 때문이라는 것을 알 수 있다.

이상으로 그림 3의 (a), (b), (c), (d) 4가지 경우에 대하여 커패시턴스값의 변화와 RC 지연시간의 변화

를 구해 보았는데, 저항은 line의 단면적과 길이, 그리고 line을 구성하는 물질에 의해서 결정되지만, 커패시턴스값은 line을 둘러싸고 있는 유전체 물질에 따라서도 큰 영향을 받기 때문에 단일 유전체 물질에서 사용하던 방법을 사용할 수 없고, 이를 고려해 줄 수 있는 방법을 사용해야만 정확한 값을 구할 수 있다는 것을 알 수 있다.

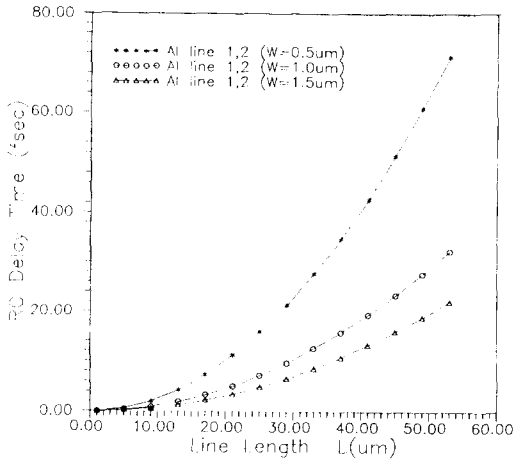


그림 9. 그림 3. (c)에서 line의 길이에 따른 RC 지연시간의 변화
 Fig. 9. RC delay time with line length variation in Fig. 3. (c)

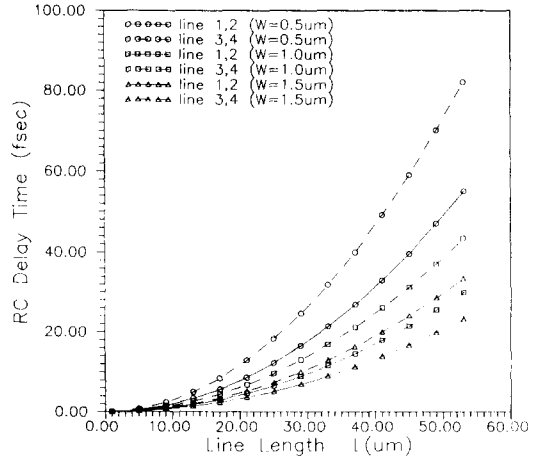


그림 11. 그림 3. (d)에서 line에서의 길이에 따른 RC 지연시간의 변화
 Fig. 11. RC delay time with line length variation in Fig. 3. (d)

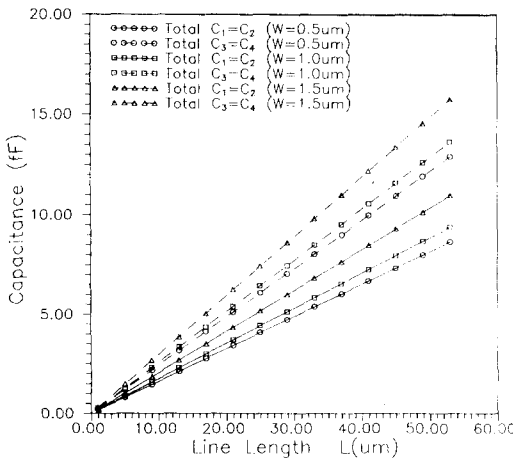


그림 10. 그림 3. (d)에서 line에서의 길이에 따른 total 커패시턴스의 변화
 Fig. 10. Total capacitance with line length variation in Fig. 3. (d)

V. 결 론

본 논문에서는 다층 유전체 구조를 갖는 VLSI interconnection line에서의 커패시턴스값을 구하는데 있어서, 3차원 직접적분 방법을 사용하였다. 이때 경계조건은 도체표면에서는 전위(potential)에 의한 식을 사용하였고, 유전체 경계면에서는 전계에 의한

식과 Gauss 법칙을 사용하였다. 이 방법은 유전체의 수나 도체의 수가 증가하더라도 효율적으로 사용할 수 있기 때문에, 보다 쉽게 interconnection에서의 커패시턴스를 구할 수 있었다. 또한 Al과 WSi_2 를 사용한 interconnection에서의 RC 지연시간을 계산하여 봄으로서, interconnection line의 두께 및 폭의 변화에 따른 저항과 커패시턴스의 변화가 회로의 지연시간에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 알아보았다. 이러한 다층유전체에서의 interconnection line의 형태에 따른 지연시간을 예측함으로써, 설계자들이 이들 자료를 이용할 수 있으리라 기대된다. 또한, 본 논문에서 사용한 방법을 좀 더 보강한다면 다층 유전체 구조에서 서로 cross 하고 있는 interconnection line에 대하여도 적용할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

[1] M. I. Elmasry, "Interconnection delays in MOSFET VLSI," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. SC-16, pp. 585-591, Oct. 1981.
 [2] K. C. Saraswat and F. Mohammadi, "Effect of scaling of interconnections on the time delay of VLSI circuits," *IEEE journal of Solis-State Circuits*, vol. SC-17, pp. 275-280, April 1982.
 [3] H. B. Bakoglu and J. D. Meindl, "Optimal

- interconnection circuits for VLSI," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-32, pp. 903-909, May 1985.
- [4] T. Sakurai, "Approximation of wiring delay in MOSFET LSI," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. SC-18, pp. 418-426, Aug. 1983.
- [5] H. B. Bakoglu, *Circuits, Interconnections, and Packaging for VLSI*. Addison-Wesley Publishing Co., 1990.
- [6] C. P. Yuan and T. N. Trick, "A simple formula for the estimation of the capacitance of two-dimensional interconnects in VLSI circuits," *IEEE Electron Devices Letters*, vol. EDL-3, pp. 391-393, Dec. 1982.
- [7] W. T. Weeks, "Calculation of coefficients of capacitance of multiconductor transmission lines in the presence of a dielectric interface," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-18, pp. 35-43, Jan. 1970.
- [8] C. Wei, R. F. Harrington, J. R. Mautz, and T. K. Sarkar, "Multiconductor transmission lines in multilayered dielectric media," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-32, pp. 439-449, Apr. 1984.
- [9] 김한구, 라계달, "VLSI 전송선로에서의 커패시턴스의 3차원 계산," 대한전자공학회논문지, 제 29권 A권 제7호, pp. 64~72, 1992.
- [10] Z. Q. Ning, P. M. Dewilde, and F. L. Neerhoff, "Capacitance coefficients for VLSI multilevel metallization lines," *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. ED-34, pp. 644-649, Mar. 1987.
- [11] T. F. Hayes and J. J. Barrett, "Modeling of multiconductor systems for packaging and interconnecting high-speed digital IC's," *IEEE Trans. on Computer-Aided Design*, vol. ED-11, pp. 424-431, Apr. 1992.

 著 者 紹 介

金 漢 求(正會員) 第27卷 第7號 參照
 현재 한양대학교 대학원
 전자공학과 박사과정

郭 桂 達(正會員) 第27卷 第7號 參照
 현재 한양대학교 전자공학과
 교수