

工學碩士 學位論文

RFIC용 박막형 ML/CPW 복합구조
전송선로에 관한 연구

A Study on Thin-Film ML/CPW Transmission Line in
Composite Structure for RFIC

指導教授 金 東 一

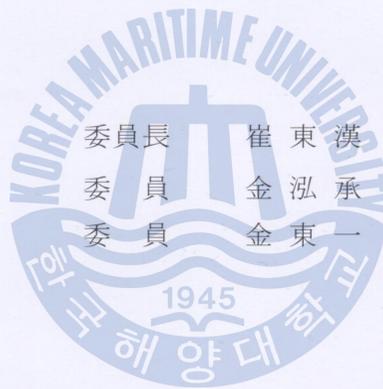
2015年 02月

韓國海洋大學校 大學院

電 波 工 學 科

孫 基 準

本論文을 孫基準의
工學碩士學位論文으로 認准함.



2015 年 2 月

韓國海洋大學教 大學院
電波工學科
孫基準

목 차

| | |
|---|----|
| Nomenclature | iv |
| Abbreviations | v |
| Abstract | vi |
| | |
| 제 1 장 연구 배경 및 목적 | 7 |
| | |
| 제 2 장 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 기본 구조 및 특성 | |
| 2.1 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 기본구조 및 단파장 특성 | 9 |
| 2.2 전송상수, 유효유전율, 손실특성 | 12 |
| 2.3 주기적 용량성 및 대역폭 | 15 |
| | |
| 제 3 장 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 특성 해석 | |
| 3.1 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 이론적 해석 | 22 |
| 3.2 측정 치와 이론 치의 비교 | 24 |
| | |
| 제 4 장 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기의 제작 및 소형화 | |
| 4.1 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기 제작 | 27 |
| 4.2 임피던스 변환기의 RF 특성과 소형화 | 28 |
| | |
| 제 5 장 결 론 | 30 |
| | |
| 참고문헌 | 32 |

Nomenclature

| | |
|--------------|---|
| C | : Capacitance |
| C_a | : Capacitance between the line and GND |
| C_b | : Additional capacitance between line and second ground |
| C_f | : Capacitance between second ground and Silicon substrate |
| d | : Length of per unit cell |
| f | : Frequency |
| L | : Inductance |
| L_{ind} | : Inductance of the line |
| L_g | : Inductance of second ground |
| R_g | : Resistance of second ground |
| Z_o | : Characteristic impedance |
| β | : Propagation constant |
| ϵ_e | : Effective permittivity |
| ϵ_0 | : Space permittivity |
| λ_g | : Guided-wavelength |
| μ_0 | : Space magnetic permeability |
| ω | : Angular frequency |

Nomenclature

| | | |
|------|---|------------------------------------|
| CPW | : | Coplanar waveguide |
| DGS | : | Defected Ground Structure |
| IC | : | Integrated Circuit |
| ML | : | Microstrip line |
| PBG | : | Photonic Band Gap |
| PGS | : | Periodic Ground Structure |
| RFIC | : | Radio Frequency Integrated Circuit |
| SoC | : | System on Chip |



A Study on Thin-Film ML/CPW Transmission Line in Composite Structure for RFIC

Ki-Jun Son

Department of Radio Communication Engineering

Graduate School of

Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In this thesis, a transmission line with thin-film microstrip line/coplanar waveguide (ML/CPW) on silicon substrate was proposed, and the RF characteristics were thoroughly investigated. The transmission line with thin-film ML/CPW composite structure exhibited the wavelength shorter than conventional coplanar waveguide or thin-film microstrip line. The transmission line with thin-film ML/CPW composite structure with the length of $\lambda/8$ showed the loss less than 1.43 dB up to 30 GHz, which was lower than that of a conventional coplanar waveguide or that of a thin-film microstrip line. Due to enhancement of periodic capacitance, the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure showed propagation constant and effective permittivity higher than those of conventional coplanar waveguide or thin-film microstrip line.

As the bandwidth extraction result, the bandwidth of the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure was more wider than 377 GHz. For application to the design of RF passive components, in addition, the equivalent circuit of the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure should be extracted for the theoretical analysis. The used closed form equation were proposed for the equivalent circuit parameters.

By using the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure, in addition, a highly miniaturized impedance transformer was fabricated on silicon substrate. The size of the impedance transformer was $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$, which was 1.04 % of the size of the transformer fabricated by a conventional coplanar waveguide on silicon substrate. The impedance transformer showed the excellent RF characteristic over broad bandwidth. The above results indicates that the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure is a promising candidate for miniaturized RF component on silicon RFIC.

제 1 장 연구배경 및 목적

현재 정보통신기술의 첨단화로 인하여 무선통신시스템 개발이 활발히 이루어지면서 무선통신 단말기의 저단가 및 소형화를 요구하고 있다[1-3]. 그리고 최근 실리콘 반도체 공정기술의 발달로 인하여 고주파 영역에서 CMOS의 응용이 가능하며[4], 고주파용 RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit)와 베이스 밴드부의 chip set이 하나의 실리콘 기판상에 집적된 SoC (System on chip) 단말기의 개발이 가능하게 되었다. 무선통신 시스템의 소형화를 위해서 SoC용 실리콘 반도체 소자 개발이 필요하지만, 필터, 분배기/결합기와 같은 대부분의 RF 수동소자들은 큰 점유면적을 차지하므로 실리콘 IC (Integrated Circuit) 내부에 집적되지 못하고 외부의 프린트 기판상에 설게 제작되고 있다 [5]. 결과적으로 이러한 문제점은 현재 전자부품 산업의 중점과제로 떠오르고 있다.

특히 무선통신 시스템을 구성하는 각종 RF 수동소자들은 전송선로를 이용하여 설계가 되기 때문에 전송선로에 관한 연구는 반드시 필요하다. 고주파 영역에서는 파장이 짧기 때문에 선로의 위치마다 전압과 위상의 변화가 심하여 선로의 형태나 길이에 따라 회로의 특성에 영향을 주게 되므로, 고주파 신호를 전달하기 위해 개발된 Microstrip line를 사용한다. 그리고 Microstrip line와 달리 한 면에 신호선과 접지면이 존재하기 때문에 TEM 모드를 구현할 수 있어 고주파가 될수록 전송특성이 양호한 Coplanar waveguide (CPW)를 사용된다. 하지만 앞서 말한 기본적인 Microstrip line 및 CPW를 사용할 경우 큰 면적을 차지하기 때문에 초소형 무선통신 시스템 구축이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 단파장을 가지는 전송선로의 연구가 절실하다. 초소형 무선통신 시스템의 개발을 위해서 사용되어야 할 단파장의 전송선로의 대표적인 기법으로는 주기적인 구조를 이용한 전송선로가 있다. 주기적인 구조를 이용한 전송선로의 대표적인 기법으로는 PBG (photonic band gap), DGS (defected ground structure)가 있다[6]. 그러나 PBG, DGS 등의 구조는 선로파장이 축

소되는 반면, 공진주파수가 낮고 특성임피던스와 삽입손실이 높다는 단점이 있다. 이에 실리콘 반도체상에서 주기적인 접지 구조를 이용한 전송선로(PGS, periodic ground structure)[7]가 개발되었지만 여전히 높은 삽입손실로 인해 상용화가 힘든 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 상기의 문제점들을 보완하기 위하여 실리콘 기판상에 박막형 Microstrip line/Coplanar waveguide (ML/CPW) 복합구조를 가지는 단파장 전송선로를 제안하였고[8], RF 특성인 전송상수, 유효유전율, 용량성, 대역폭, 손실 특성에 관하여 연구와 등가회로 및 closed-form equation을 이용하여 이론적으로 해석을 통하여 상기 선로 구조에 대하여 RFIC 상에서 응용 가능성을 연구하였다.

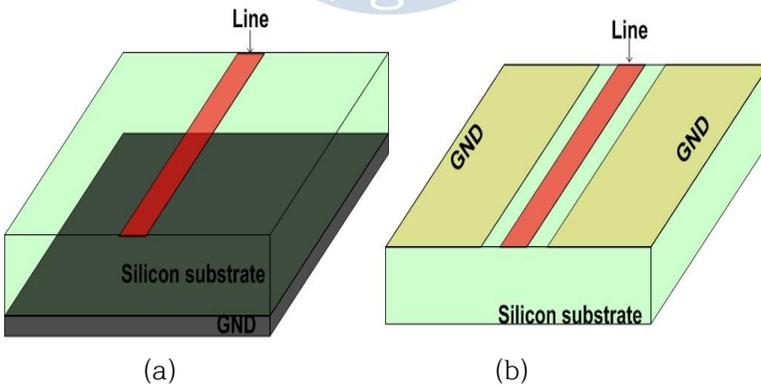


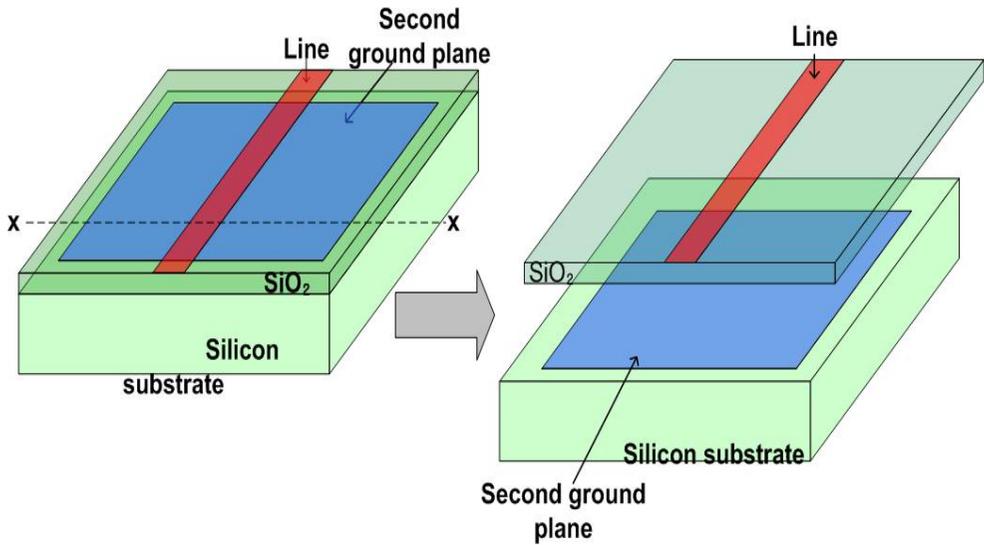
제 2 장 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 기본 구조 및 특성

2.1 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 기본구조 및 단파장특성

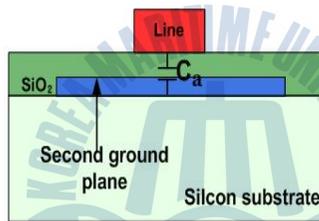
본 절에서는 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 단파장 선로의 구조에 관하여 설명하도록 한다.

Fig. 1 (a)는 종래의 마이크로스트립 선로이며, 접지면상에 실리콘 기판과 선로가 존재한다. Fig. 1 (b)는 종래의 코프레너 선로를 보여주고 있으며, 실리콘 기판상에 신호라인과 접지면이 존재하게 된다. 그리고 Fig. 1 (c)는 종래의 박막형 마이크로스트립 선로이다. 실리콘 기판과 제 2 접지면 사이에 SiO₂ 박막 필름이 존재하고, SiO₂ 박막필름 상부에 신호라인이 있어서 제 2 접지면과 신호라인 사이에 단위 길이 당 용량 C_a 가 발생한다. 여기서 발생하는 단위 길이 당 용량 C_a 는 Fig. 1 (a), (b)의 종래의 마이크로스트립 선로와 코프레너 선로보다 큰 용량성분을 가진다. 이러한 고용량 특성으로 인하여 종래의 선로보다 단파장 특성을 보여주고 있다[9].





(A cross-sectional view of X-X)



(c)

그림 1 전형적인 전송선로.

Fig. 1 Some typical waveguides.

Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 구조를 보여주고 있다[8]. 최하층 실리콘 기판과 SiO₂ 박막필름 사이에 제 2 접지면이 존재하고, SiO₂ 상부에 신호라인과 상부 접지면이 존재하게 된다. 그리고 제 2 접지면은 상부 접지면으로부터 Contact를 통하여 접지전위를 공급받아 선로와 제 2 접지면 사이에 추가적인 단위 길이 당 용량 성분 C_b가 발생하여 전체용량은 $C = C_a + C_b$ 가 되므로, 종래의 박막필름 마이크로 스트립 선로보다 선로파장이 더 줄어들게 된다.

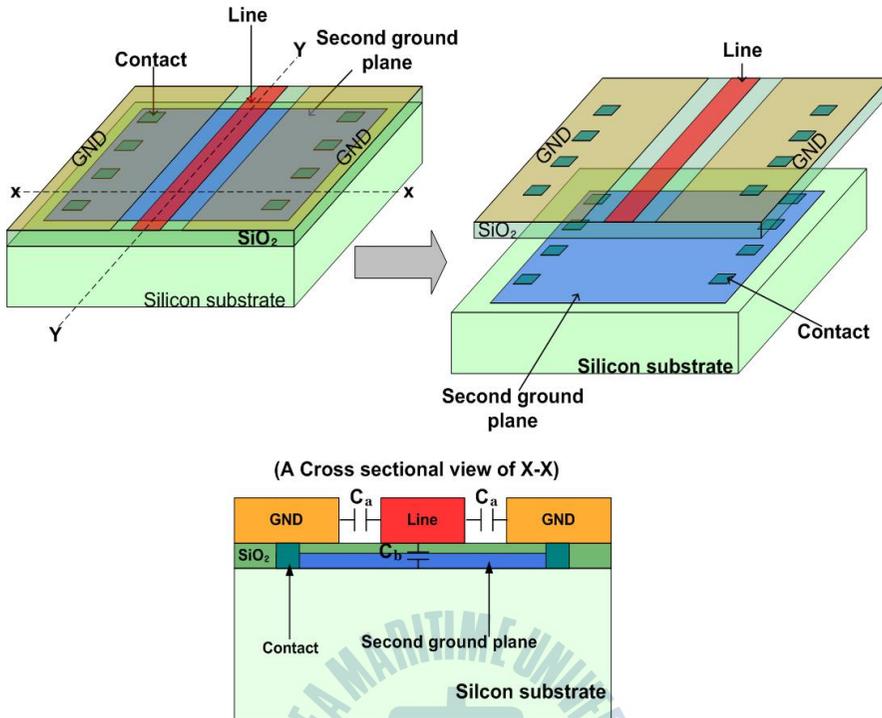


그림 2. 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 전송선로의 구조.

Fig. 2 The transmission line with thin-film microstrip line/coplanar waveguide(ML/CPW) composite structure.

아래 식은 선로파장과 용량사이의 관계식으로, 식 (1)은 종래의 선로에 해당되며, 식 (2)는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로에 해당된다.

아래의 식에서 f 는 동작주파수, L 은 단위 길이 당 인덕턴스, C 는 단위 길이 당 용량, λ_g 는 선로파장이다.

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{f\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{f\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{L(C_a + C_b)}} \quad (2)$$

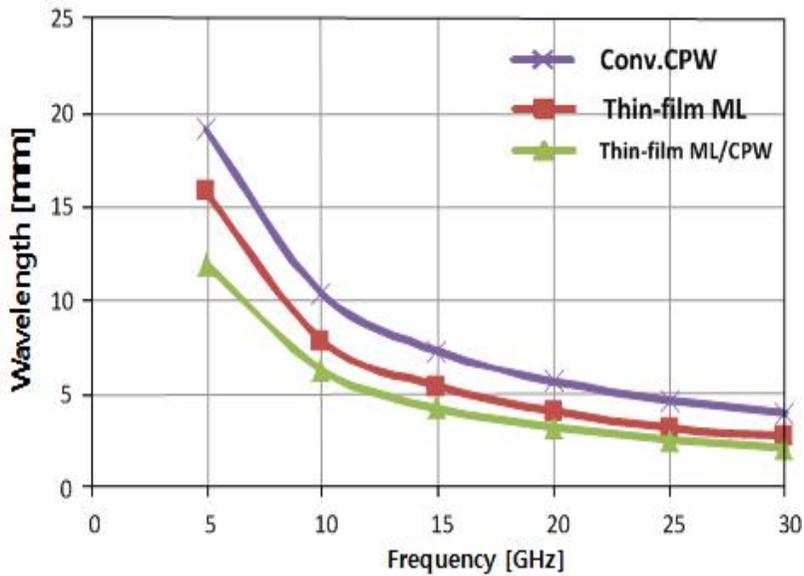


그림 3 실리콘 기판상에 제작된 다양한 선로들의 선로파장 측정결과.
 Fig. 3 Wavelength of various transmission lines on silicon substrate.

Fig. 3은 종래의 코프레너 선로, 박막형 마이크로스트립 선로, 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 선로의 선로파장 측정값을 비교한 결과이다. 박막형 마이크로스트립 선로와 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 600 μm 두께의 실리콘 반도체 기판상에 제작되었으며, 제 2 접지면과 선로사이의 SiO_2 박막필름은 유전율이 3.9, 두께가 1 μm 이다. 그리고 Fig. 2의 신호라인의 폭과 신호라인과 접지면사이의 간격은 20 μm 이다.

상기의 그림에서 알 수 있듯이 박막형 ML/CPW 복합구조 선로가 가장 높은 파장축소 효과를 보이고 있으며, 구체적으로 10 GHz 에서 종래의 코프레너 선로와 박막형 마이크로스트립 선로의 선로파장은 각각 10.35, 7.83 mm 인 반면에 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 선로파장은 6.26 mm로써 종래 코프레너 선로의 60.5 %로 축소되었다.

따라서 박막형 ML/CPW 복합구조 선로를 이용하면, RFIC 외부의 프린트 기판 상에 설계 및 제작되고 있는 RF 수동소자의 크기를 대폭 축소할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 전송상수, 유효유전율, 손실 특성

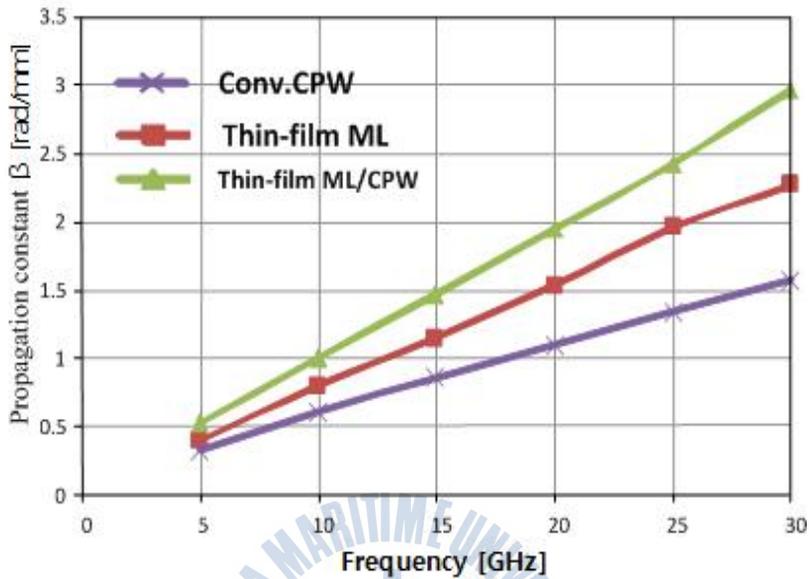


그림 4 실리콘 기판상에 제작된 다양한 선로들의 전송상수 β 측정결과.

Fig. 4 Propagation constant β of various transmission lines on silicon substrate.

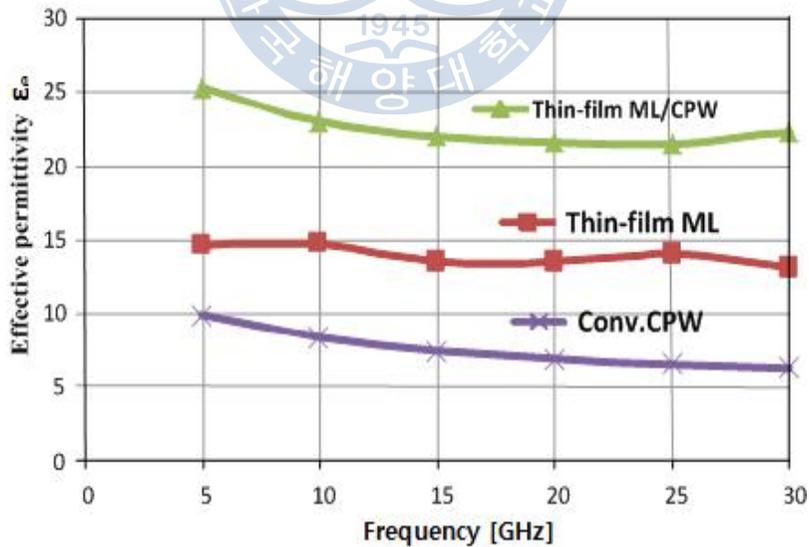


그림 5 실리콘 기판상에 제작된 다양한 선로들의 유효유전율 측정결과.

Fig. 5 Effective permittivity of Various transmission lines on silicon substrate.

본 연구에서는 종래의 코플레너 선로, 박막형 마이크로스트립 선로와 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 전송상수 및 유효유전율에 대한 기본특성을 고찰하고자 한다. 상기의 Fig. 4 및 5는 각각 전송상수와 유효유전율의 결과 값을 보여주고 있다.

$$\epsilon_e = \left(\frac{2\pi}{\omega\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \right)^2 \quad (3)$$

유효유전율은 선로과장 측정결과로부터 식 (3)을 이용하여 추출할 수 있으며, ω , μ_0 , ϵ_0 , ϵ_e 는 각각 동작 주파수 f 에 대한 각주파수 $2\pi f$, 공기 중의 투자율과 유전율 및 실리콘 기판의 유효유전율이다. Fig. 4 및 5에서 보는 바와 같이 박막형 ML/CPW 복합구조 선로가 훨씬 큰 전송상수와 유효유전율 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 다음과 같이 설명 될 수 있다. 박막형 ML/CPW 복합구조 선로가 종래의 선로보다 β 값이 큰 slow-wave가 존재하기 때문이다.

표 1 종래의 코플레너 선로와 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 $\lambda/8$ 선로의 삽입손실 측정결과.

Table 1 Insertion losses of conventional coplanar waveguide and transmission line with thin-film ML/CPW composite structure on a silicon substrate with $\lambda/8$ length.

| Structure \ Freq. | 15 [GHz] | 20 [GHz] | 25 [GHz] | 30 [GHz] |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Conv.CPW | 1.34 [dB] | 1.27 [dB] | 1.17 [dB] | 1.08 [dB] |
| Thin-film ML/CPW | 1.12 [dB] | 0.92 [dB] | 0.75[dB] | 0.65 [dB] |

Table 1은 종래의 코프레너 선로와 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 손실특성을 비교한 결과이다. 파장 축소효과를 감안하여 $\lambda/8$ 선로에서 손실특성을 비교하였으며, 상기의 결과에서 알 수 있듯이 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 선로는 종래의 코프레너 선로보다 저손실 특성을 보인다. 종래의 코프레너 선로의 경우 실리콘 반도체 기판이 높은 도전율을 가져서 실리콘 반도체 기판이 상부층 신호라인과 접지면 사이에 RF 전류가 흐르기 때문이다. 반면 본 논문에서 제안한 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 SiO_2 유전체 박막필름이 존재하여 RF 전류가 거의 흐리지 않고, 제 2 접지면과 상부의 신호라인 사이에 커플링이 발생하여 손실을 줄일 수 있다.

상기의 결과들로 볼 때, 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 단파장의 저손실 특성을 가지는 RF 수동소자 개발에 응용 가능성을 보여주었다.

2.3 주기적 용량성 및 대역폭

본 절에서는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 주기적 용량성분을 통해서 대역폭을 계산하였다.

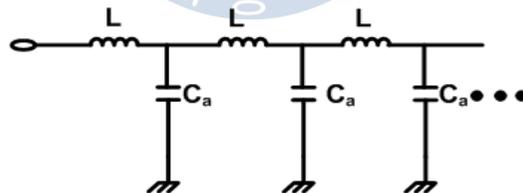


그림 6 박막형 마이크로스트립 선로의 등가회로.
Fig. 6 Equivalent circuit of thin-film microstrip line.

Fig. 6은 박막형 마이크로스트립 선로의 등가회로를 나타낸 것이며, 주기적인 용량 C_a 와 인덕턴스 L 이 존재한다. 본 논문에서 제안한 박막형 ML/CPW 복합구조 선로가 단파장을 보이는 이유는 종래의 전송선로에 비해 전체적인 용량이 증가하였기 때문이며, 따라서 종래의 박막형 마이크로스트립 선로의 등가회로

에 용량 C_b 가 주기적으로 존재하는 전송선로로 표현가능하며, 아래의 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

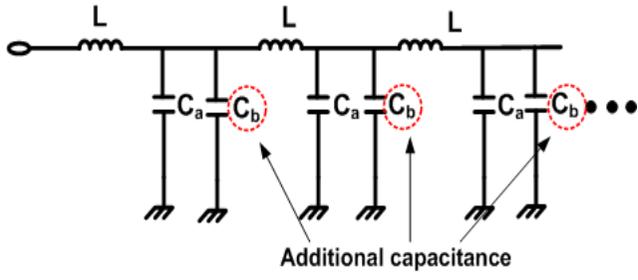


그림 7 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 등가회로.

Fig. 7 Equivalent circuit of transmission line with thin-film ML/CPW composite structure.

아래의 식 (4) ~ (6)은 각각 전송선로에 대한 전파상수, 특성임피던스 및 단위길이 당 용량을 구하는 수식이다.

$$\beta \approx \omega \sqrt{LC} \tag{4}$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{5}$$

$$C = \frac{L}{Z_o^2} = \frac{\beta}{\omega Z_o} = \frac{1}{\omega Z_o} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \tag{6}$$

상기의 식에서 β , ω , L , C , Z_o 는 각각 전파상수, 동작 주파수 f 에 대한 각 주파수 $2\pi f$, 단위 길이 당 인덕턴스, 단위 길이 당 커패시턴스, 전송선로의 특성임피던스이고 식 (5)에서의 C 는 단위길이 당 용량 값을 구하는 수식이다.

Fig. 8은 종래의 코프레너 선로, 박막형 마이크로스트립 선로, 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 단위 길이 당 용량 값을 상기 수식을 이용하여 추출한 결과이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 박막형 ML/CPW 복합구조 선로가 다른 선로에 비해 큰 용량 값을 보여주고 있으며, 구체적으로 종래의 코프레너 선로, 박막형 마이크로스트립 선로, 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 선로의 단위 길이 당 용량의 평균값은 각각 0.15, 0.35, 0.88 pF/mm이다. 본 결과로부터 용량 값이 클수록 선로파장

축소효과를 가지는 것을 알 수 있으며, 단위 길이 당 용량 값이 가장 큰 박막형 ML/CPW 복합구조 선로가 단파장 특성을 보인다는 것을 알 수 있다.

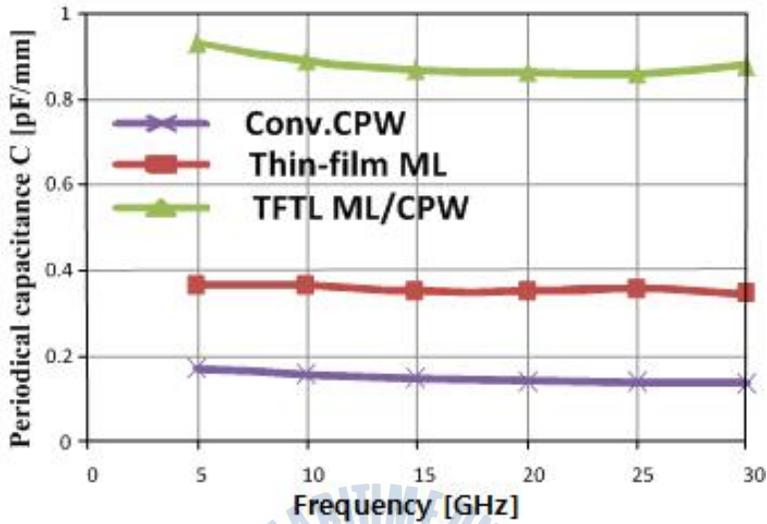


그림 8 실리콘 기판상에 제작된 다양한 선로들의 단위 길이 당 용량 측정결과.
 Fig. 8 Measured equivalent periodic capacitance per unit length for various transmission lines on silicon substrate.

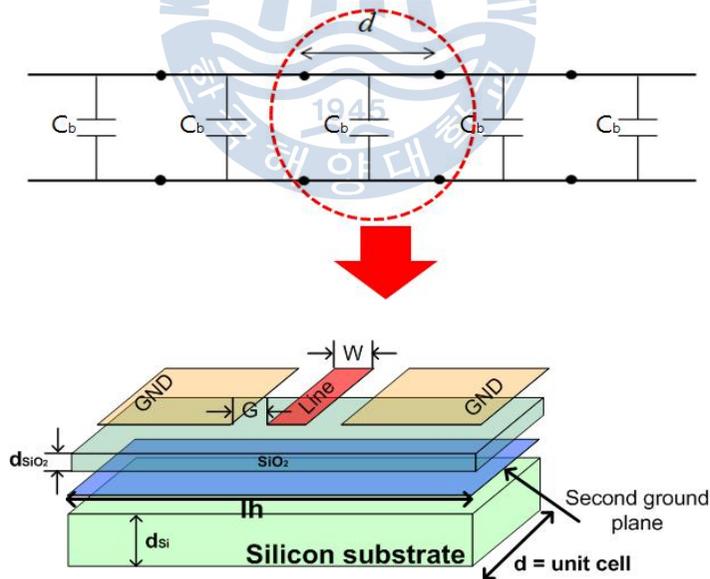


그림 9 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 주기적인 부하 용량 C_b 의 등가회로.
 Fig. 9 Equivalent circuit of the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure with periodically loaded capacitance C_b .

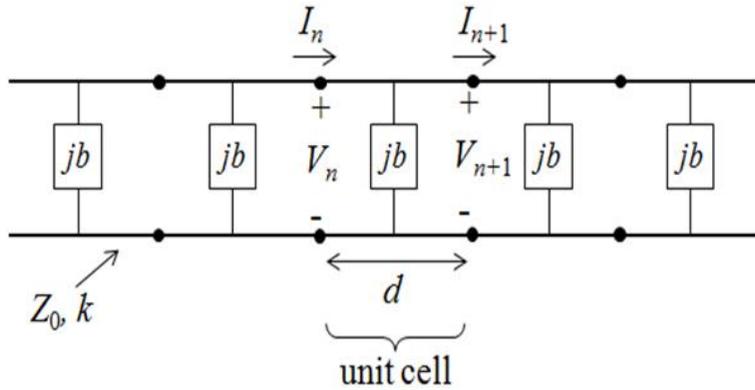


그림 10 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 전압 및 전류의 등가회로.

Fig. 10 Voltage and current on the equivalent circuit of the transmission line with thin-film ML/CPW composite structure.

또한, 본 연구에서는 상기의 결과를 토대로 대역폭을 추출하기 위하여 주기적인 등가회로를 이용하였다[11]. Fig. 9와 같이 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 용량 C_a 와 인덕턴스 L 로 구성된 전송선로와 추가적인 용량 C_b 로 나타낼 수 있고, 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 추가적인 용량 C_b 가 종단된 길이 d 인 주기적인 전송선로의 등가회로를 표현하고 있다. 상기 내용에서 설명한 바와 같이 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 용량 C_a 와 C_b 를 갖지만, 용량 C_a 는 상부의 신호라인과 접지면 사이에 존재하므로, 길이 d 인 주기적인 전송선로에 포함되어 있다. 추가적인 용량 C_b 는 주기적인 세셉턴스 jb 로 표현 가능하며 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$jb = j\omega C_b / Y_0 = j\omega C_b Z_0 \quad (7)$$

$$b = \omega C_b Z_0 \quad (8)$$

상기 식에서 ω 및 Z_0 는 각각 동작주파수 f 에 대한 각주파수 $2\pi f$ 이며, Z_0 는 종래의 코플레너 선로의 특성임피던스이다. 위의 Fig. 9에서 단위 셀 d 의 길이는 $40 \mu\text{m}$ 이며, SiO_2 박막필름의 두께는 $1 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 10은 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 등가회로 상에 존재하는 전류 및 전압을 보여주고 있으며, 본 구조의 n 번째 단위 셀에 대한 입출력 전류 I_n, I_{n+1} 과 입출력 전압 V_n, V_{n+1} 은 ABCD 행렬에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd) & j(\sin kd + \frac{b}{2} \cos kd - \frac{b}{2}) \\ j(\sin kd + \frac{b}{2} \cos kd + \frac{b}{2}) & (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$kd = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_e} d \quad (11)$$

상기 식에서 μ_0 , ϵ_0 , ϵ_e 는 각각 공기에 대한 투자율, 유전율 그리고 종래 코프레너 선로의 유효유전율이다. 이때 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 전파상수를 Γ 라고 가정하면 아래 식과 같이 표현 가능하다.

$$V_{n+1} = V_n e^{-\gamma d} \quad (12)$$

$$I_{n+1} = I_n e^{-\gamma d} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} V_n \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} e^{\gamma d} \\ I_{n+1} e^{\gamma d} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} A - e^{\gamma d} & B \\ C & D - e^{\gamma d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

위의 방정식이 0이 아닌 근을 갖으며, 무손실 회로에서 $AD - BC = 1$ 임을 적용하여 방정식을 풀이하면 다음과 같다.

$$\frac{e^{-\gamma d} + e^{+\gamma d}}{2} = \cosh \gamma d \quad (15)$$

$$\frac{(A+D)}{2} = (\cos kd - \frac{b}{2} \sin kd)$$

본 연구에서 제안한 선로의 전파상수 Γ 는 손실을 가지고 있으므로 $\Gamma = \alpha + j\beta$ 가 되어, 아래의 수식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \cos \gamma d &= \cosh \alpha d \cos \beta d + j \sin \alpha d \sin \beta d \\ &= \cos kd - \frac{b}{2} \sin kd \end{aligned} \quad (16)$$

상기 식을 통하여 $\alpha=0$, $\beta \neq 0$ 일 때 통과대역을 구할 수 있고, 반대로 $\alpha \neq 0$, $\beta=0$ 일 때 저지대역을 구할 수 있다. 통과대역과 저지대역을 구할 수 있는 수식은 다음과 같다.

$$\cos \beta d = \cos kd - Xkd \sin kd, \text{ Passband} \quad (17)$$

$$\cos \alpha d = |\cos kd - Xkd \sin kd| \geq 1, \text{ Stopband} \quad (18)$$

$$X = \left(\frac{C_b Z_o}{2 \sqrt{\epsilon_e} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} d} \right) \quad (19)$$

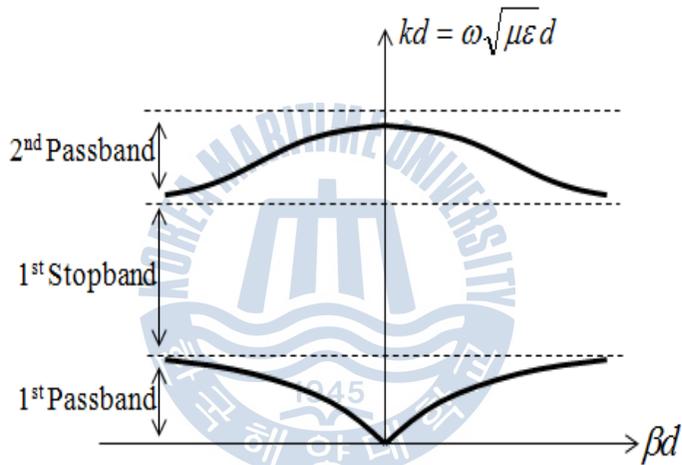


그림 11 K- β 그래프.

Fig. 11 k- β graph.

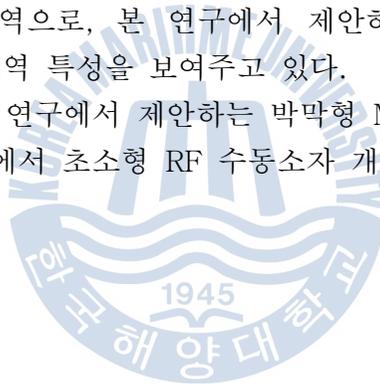
표 2 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 통과대역과 저지대역의 측정결과.

Table 2 Measured pass and stopband of transmission line with thin-film ML/CPW composite structure.

| Structure \ band | 1st Passband [GHz] | 1st Stopband [GHz] | 2nd Passband [GHz] |
|------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|
| Thin-film ML/CPW | $f \leq 377$ B·W : 377 | 377 ~ 1360 | 1360 ~ 1464 B·W : 104 |

Fig. 11은 상기 식 (17) ~ (19)를 통해서 통과대역과 저지대역의 관계를 나타낸 것이며, Table 2는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 통과대역 및 저지대역 특성 결과를 보여주고 있다. RF 대역에서 물리적으로 의미가 있는 대역폭은 1차 통과대역으로, 본 연구에서 제안하는 선로의 차단주파수는 377 GHz 이상의 광대역 특성을 보여주고 있다.

상기 결과로부터, 본 연구에서 제안하는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 377 GHz까지 광대역에서 초소형 RF 수동소자 개발에 유용하게 사용 될 수 있을 것이다.



제 3 장 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 특성 해석

3.1 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 이론적 해석

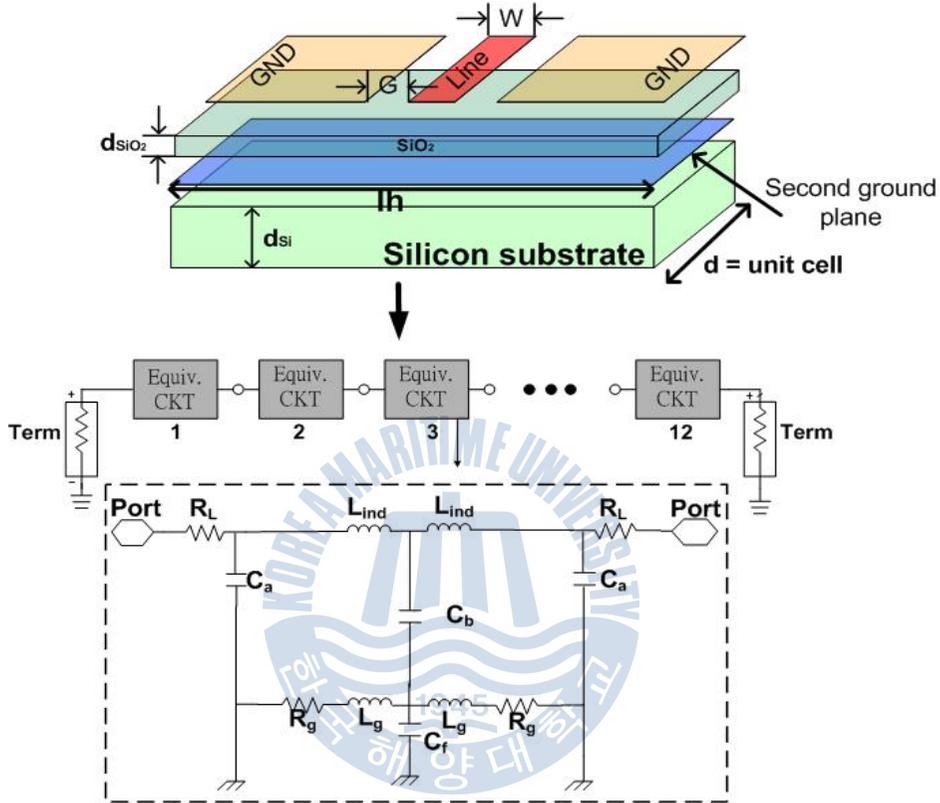


그림 12 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 단위 길이 당 셀의 구조.

Fig. 12 Per unit cell of transmission line with thin-film ML/CPW composite structure.

본 절에서는 RF 수동소자 개발에 응용하기 위하여 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 등가회로를 이용하여 이론적으로 해석하였다. 앞 절에서 고찰한 주기적인 서셉턴스가 존재하는 등가회로는 대역폭의 계산에 유용하게 사용되기 때문에 실지 RF 회로설계에 사용하기 위해서는 손실특성들을 고려한 RLC 등가회로가 이용되어야 하며, closed-form equation으로 표현되어야 한다. Fig. 12는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 N^{th} 단위 셀의 등가회로를 나타내고 있다. 앞 절에서 말한 것과 같이 제 2 접지면은 실리콘 기판과 SiO_2 박막필름 사이에 존재하며 비아 홀(contact)을 통하여 전기적

으로 연결되었기 때문에 그라운드면의 역할을 하고, 추가적인 용량 C_b 는 상부의 신호라인과 제 2 접지면 사이에 발생하는 정전용량과 일치한다. 그리고 L_{ind} , R_L , C_a , R_g , L_g 는 각각 선로의 상부에 존재하는 기생 인덕턴스, 저항 성분, 상부의 신호라인과 접지면 사이에 커플링에 의해 발생하는 주기적인 용량성분, 제 2 접지면에 발생하는 저항과 인덕턴스 성분이다.

또한, 실리콘 반도체 기판과 제 2 접지면 사이에도 미세한 용량 C_f 가 발생한다. 위의 등가회로 파라미터들은 아래의 식 (20) ~ (25)와 같이 신호라인의 폭 W , 신호라인과 접지면 사이의 간격 G , SiO_2 박막필름 두께 d_{SiO_2} 들을 함수로 하는 closed-form equation으로 표현 가능하며, 아래의 식의 각각의 RLC 값은 측정값과 등가회로로부터 계산 값과의 curve-fitting으로 구하였다.

$$C_a = [0.049 - 0.813 * (\frac{d}{G}) + 0.397 * (\frac{d}{G})^2] (pF) \quad (20)$$

$$C_b = [1.57 * 10^{-4} + 3.12 * 10^{-6} * (\frac{d}{d_{SiO_2}}) - 1.76 * 10^{-3} * (\frac{d}{d_{SiO_2}})^2] (pF) \quad (21)$$

$$L_g = 7.24 * \frac{l_h}{d} (nH) \quad (22)$$

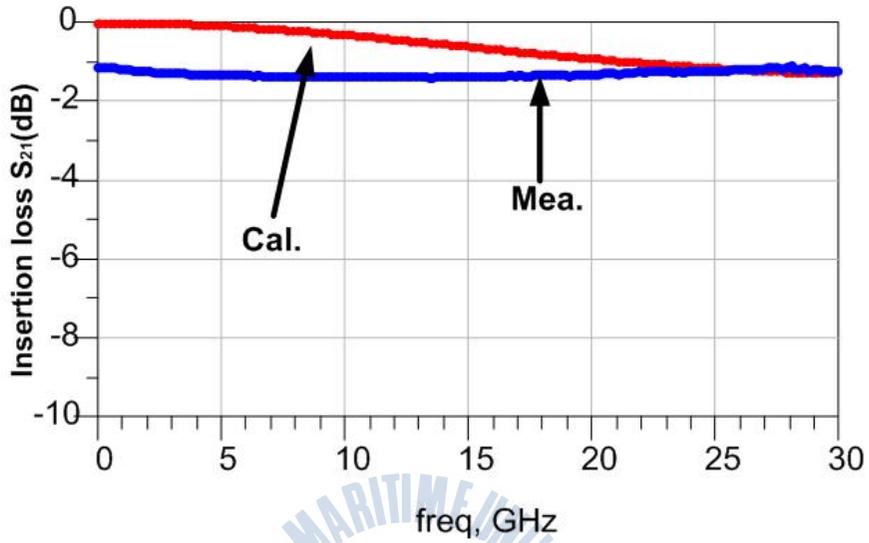
$$L_{ind} = [0.038 - 0.191 * (\frac{d}{W}) + 0.0883 * (\frac{d}{W})^2] (nH) \quad (23)$$

$$R_g = 0.998 * \frac{d}{l_h} (\Omega) \quad (24)$$

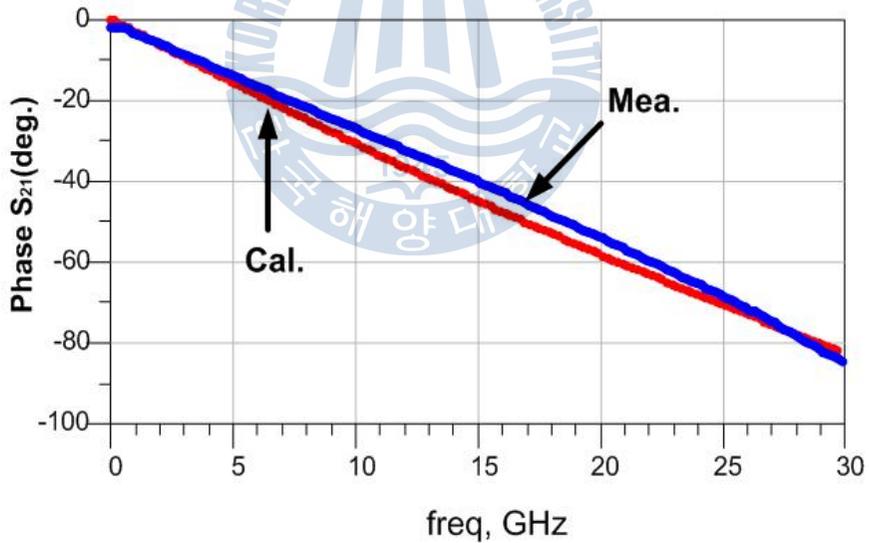
$$C_f = 1.24 * \frac{d}{d_{si}} (pF) \quad (25)$$

상기 식 (20) ~ (25)에서 d_{SiO_2} , d_{Si} , l_h 는 각각 SiO_2 박막필름의 두께, 실리콘 기판의 두께, 제 2 접지면의 폭을 의미한다. 본 논문에서 제안한 전송선로는 $W = 20 \mu m$, $l_h = 284 \mu m$, $d_{SiO_2} = 1 \mu m$, $d_{Si} = 600 \mu m$ 이다. 그리고 식 (21)에서 $(d/d_{SiO_2})^2$ 이 포함되어 있는 이유는 기생용량성분으로 인한 비선형성이 존재하기 때문이다.

3.2 측정 치와 이론 치의 비교



(a) Insertion loss



(b) Phase delay

그림 13 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 RF 특성 비교

($W=20\mu\text{m}$, $l_h=284\mu\text{m}$, $d_{\text{SiO}_2}=1\mu\text{m}$, $d_{\text{Si}}=600\mu\text{m}$).

Fig. 13 RF characteristics of transmission line with thin-film ML/CPW composite structure($W=20\mu\text{m}$, $l_h=284\mu\text{m}$, $d_{\text{SiO}_2}=1\mu\text{m}$, $d_{\text{Si}}=600\mu\text{m}$).

본 절에서는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 등가회로와 closed-form equation을 이용하여 RF 특성을 측정값과 계산 값을 이론적으로 연구하였다. Fig. 13 (a)와 (b)는 각각 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 삽입손실과 위상특성을 측정된 결과 값과 계산된 수치를 비교한 것이다. 계산의 결과를 위하여 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 등가회로와 closed-form equation을 이용하였다.

Fig. 13에서 알 수 있듯이 삽입손실의 경우 0 ~ 30 GHz 범위에서 측정값과 계산값은 최대 -1.2 dB의 차이를 보이며 양호한 RF 특성이 보였으며, 위상차의 경우 측정결과와 계산결과는 거의 일치함을 볼 수 있다.



제 4 장 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기의 제작 및 소형화

4.1 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기 제작

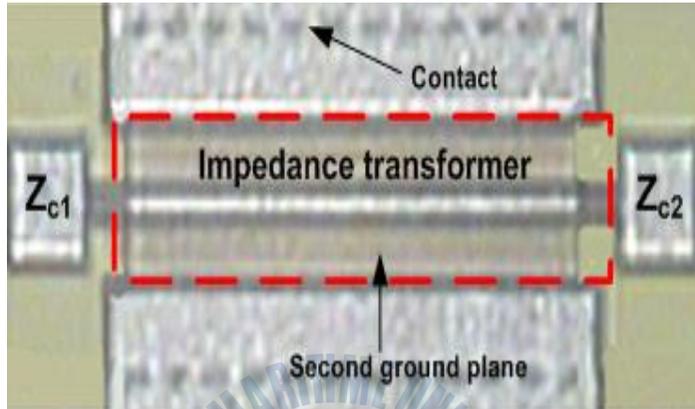


그림 14 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기.

Fig. 14 A photograph of the miniaturized impedance transformer with thin-film ML/CPW composite structure.

임피던스 변환기란 서로 다른 임피던스를 가지는 두 단 사이에서 신호를 원활하게 흐르도록 연결해주는 것이며, 특히 고주파 회로에서는 회로의 입·출력 신호를 원활하게 전달하기 위하여 매칭회로가 중요하다. 임피던스 변환기의 종류는 저항 형, 트랜스 형, 전송선로 형으로 구분된다. 본 논문에서는 가장 저손실로 매칭을 구현할 수 있는 전송선로 형으로 설계하였으며, 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용하여 실리콘 기판상에 RF 대역에서 사용가능한 초소형 임피던스 변환기를 제작하였다.

Fig. 14는 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용하여 제작한 임피던스 변환기이며, 추가적인 용량성분 C_b 가 발생하여 상기의 식 (5)로부터 특성 임피던스 Z_0 값이 줄어들게 됨을 알 수 있다. 상기의 임피던스 변환기의 특성 임피던스 Z_0 는 다음의 관계식이 만족되어야 한다.

$$Z_0 = \sqrt{Z_{c1} \cdot Z_{c2}} \quad (26)$$

본 연구에서는 소스 임피던스 $Z_{c1} = 12 \Omega$, 부하 임피던스 $Z_{c2} = 27 \Omega$ 으로 상기 식 (26)으로부터 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기 특성 임피던스는 18Ω 임을 알 수 있다.

4.2 임피던스 변환기의 RF 특성과 소형화

본 절에서는 종래의 코플레너 선로를 이용한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기와 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 사이즈를 비교하였다. Table 3은 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 사이즈를 비교한 결과이며, Table 3에서 알 수 있듯이 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기의 사이즈는 $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ 로 종래의 코플레너 선로를 이용한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기 면적의 1.04 % 정도의 크기로 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용할 경우 소형화된 임피던스 변환기의 제작이 가능함을 보여주고 있다.

표 3 실리콘 기판상에 제작된 종래의 코플레너 선로 및 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 크기 비교.

Table 3 Size of the $\lambda/4$ impedance transformer with thin-film ML/CPW composite structure and conventional coplanar waveguide on silicon substrate.

| Items | $Z_o = 18 \Omega$ | | Size [mm ²] | center Freq. [GHz] |
|-------------|------------------------|-------------|-------------------------|--------------------|
| | Signal line width [mm] | Length [mm] | | |
| Conv.CPW | 1 | 0.96 | 0.96 | 31.6 |
| TFTL ML/CPW | 0.02 | 0.5 | 0.01 | |

Fig. 15는 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기의 RF 특성을 보여주고 있다. 상기의 결과에서 보는 바와 같이 중심주파수는 31.6 GHz에서 -31 dB의 반사손실과 -1.2 dB 이하의 삽입손실 특성이 관찰되며, 18 ~ 41 GHz 대역에 걸쳐서 -10 dB 이하의 반사손실과 $-1.7 \pm 0.4 \text{ dB}$

이하의 삽입손실 특성이 가진다. 이와 같은 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 초소형 임피던스 변환기의 특성은 RFIC 상에서 RF 소자간의 임피던스 정합에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 의미한다.

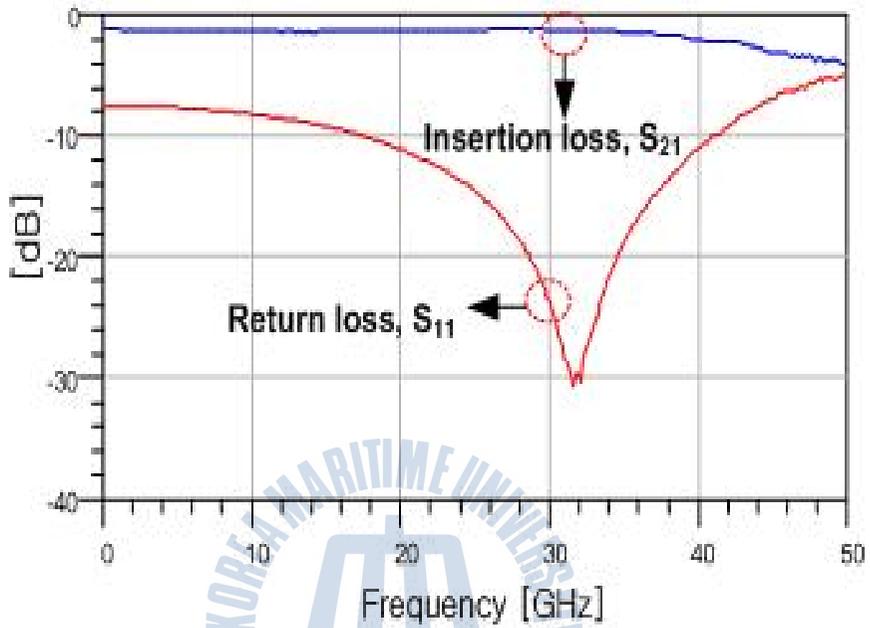


그림 15 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용한 임피던스 변환기의 RF 특성.
 Fig. 15 RF characteristics of the impedance transformer with thin-film ML/CPW composite structure.

제 5 장 결 론

최근 정보통신기술이 첨단화로 인하여 무선통신시스템의 개발이 활발히 이뤄지고 있는 실정이다. 급격한 발전에 맞춰 무선통신 단말기의 저단가 및 소형화가 필요하며, 이러한 요구를 충족 시켜주기 위해서는 RF 소자들의 집적화가 필요한 추세이다. 본 연구에서는 실리콘 반도체 기판상에 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 전송선로를 개발하였다. 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 선로과장은 종래의 코프레너 선로에 비해 과장축소 효과를 가지며, 10 GHz에서 종래의 코프레너 선로의 선로과장은 10.35 mm인 반면에 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 6.26 mm로 종래 코프레너 선로의 60.5 %의 과장 축소효과를 보였다. 그리고 상기의 박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 종래의 코프레너 선로와 $\lambda/8$ 선로에 대한 손실 특성을 비교한 결과 저손실 특성을 보였으며, 30 GHz까지 1.12 dB 이하의 손실 특성을 가진다.

박막형 ML/CPW 복합구조 선로는 높은 slow-wave 특성에 의해 종래의 코프레너 선로보다 높은 전송상수와 유효유전율 값을 보였다. 본 연구에서는 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 주기적 용량 및 대역폭에 관하여 연구하였으며, 주기적 용량의 경우 추가적인 용량 C_b 에 의하여 종래의 코프레너 선로 및 박막형 마이크로스트립 선로보다 높은 용량 값을 보여주었다. 이와 같은 결과는 과장축소 효과를 증명할 수 있는 척도가 될 수 있으며, 주기적 용량을 통하여 박막형 ML/CPW 복합구조 선로의 대역폭을 추출하였다. 대역폭의 경우 377 GHz까지 광대역 특성을 보이며 광대역의 초소형 RF 수동 소자 개발에 응용 가능성을 알 수 있다.

한편, 상기 박막형 ML/CPW 복합구조를 RLC 등가회로와 closed-form equation을 이용하여 이론적으로 해석하였다. 삽입손실과 위상차를 RLC 등가회로 및 closed-form equation을 이용하여 계산한 수치를 비교한 결과는 30 GHz 이하의 대역에서 양호한 RF 특성을 나타내며 측정결과와 잘 일치함을 확인하였다.

상기 박막형 ML/CPW 복합구조를 이용하여 실리콘 반도체 기판상에 임피던스 변환기를 제작한 결과, 점유면적은 종래의 코프레너 선로를 이용한 임피던스 변환기 면적의 약 1.04 % 정도로 대폭 축소되었다. 본 논문에서 제안한 임피던스 변환기는 광대역에 걸쳐서 양호한 RF 특성을 보였다. 구체적으로 중심주파수는 31.6 GHz에서 -31 dB의 반사손실과 -1.2 dB 이하의 삽입손실 특성을 보였으며, 18 ~ 41 GHz 대역에 걸쳐서 -10 dB 이하의 반사손실과 -1.7 ± 0.4 dB 이하의 삽입손실 특성을 보였다. 따라서, 박막형 ML/CPW 복합구조를 가지는 전송선로는 초소형 온칩용 RF 수동 및 정합소자에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.



참 고 문 헌

- [1] Webster D. R., Ataei G. & Haigh D. G., "Low-Distortion MMIC Power Amplifier Using a New Form of Derivative Superposition", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, No. 2, Vol. 49, pp. 328-332, 2001.
- [2] J. C. Chiu, J. M. Lin, & Y. H. Weang, "A Novel Planar Three-Way Power Divider", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, Vol. 16, No.8, pp. 449-451, 2006.
- [3] Y. B. Park, et al., "Highly miniaturized passive components employing novel π -type multiple coupled microstrip lines", *Proceeding of 10th Conference On Science and Technology*, pp.135-138, 2007.
- [4] T. P. Wang, & H. Wang, "A 71-80GHz Amplifier Using 0.13 μ m CMOS Technology", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, Vol.17, No.9, pp.685-687, 2007.
- [5] Y. Yun, T.Fukuda, T.Kunihisa, & O.Ishikawa, "A High Performance Down converter MMIC for Applications", *IEICE Trans. Electron.*, vol.E84-C ,no.11, pp.1679-1688, 2001.
- [6] Y. Yun, et al., "Basic RF Characteristics of the Microstrip Line Employing Periodically Perforated Ground Metal and Its Application to Highly Miniaturized On-Chip Passive Components on GaAs MMIC", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 54, No. 10, pp. 3805-3817, Oct., 2006.
- [7] J. H. Jeong, et al., "An Equivalent Circuit Analysis of Coplanar Waveguide Employing Periodic Ground Structure on GaAs MMIC," *Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 614-617, 2010.
- [8] K. J. Son, Jeong J. H. , Han S. J., & Yun Y., "A Short Wavelength and Low Loss Thin-Film Transmission Line Employing ML/CPW Composite Structure on Silicon Substrate", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.442 pp. 138-141, 2014.
- [9] D. P. Shea & J. E. Mitchell, "A 10 Gb/s 1024-way split 100-km long reach optical access network", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 685-293, 2007.

[10] 손기준, 정장현, 한성조, 윤영, "실리콘 RFIC 상에서 무선 통신 시스템의 소형화를 위한 제 2 그라운드 구조를 가지는 단파장 전송선로의 등가회로에 관한 연구, *하계 종합 학술 발표회*, 한국통신학회 논문집, Vol56, pp.285-286, 2013.

[11] D. M. Pozar, 1990, *Microwave Engineering*. Reading, MA: Addison-Wesley.

본 논문과 관련된 발표논문

◎ 전문 학술지 게재 논문

[1] 손기준, 정장현, 윤영, "실리콘 RFIC 상에서 무선통신시스템의 소형화를 위한 마이크로스트립/코프레너 복합구조를 가지는 박막필름 전송선로의 등가회로 및 대역폭에 관한연구", *한국마린엔지니어링학회지*, 제 39 권, 제 1호(2015년 1월 게재예정)

[2] J. H. Jeong, K. J. Son, Y. Yun, "Basic Study on RF Characteristics of Thin-Film Transmission Line Employing ML/CPW Composite Structure on Silicon Substrate and Its Application to a Highly Miniaturized Impedance Transformer", *전기전자재료학회*, (2015년 2월 게재예정)

◎ 국회 학술대회 발표논문

[1] K. J. Son, J. H. Jeong, S. J. Han, Y. Yun, "A Short Wavelength and Low Loss Thin-Film Transmission Line Employing ML/CPW Composite Structure on Silicon Substrate", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.442 pp.138-141, 2014.

[2] K. J. Son, J. H. Jeong, S. J. Han, Y. Yun, "Study on Basic RF characteristics of transmission line employing additional ground plane on semiconducting substrate", *IEICE Technical Report*, Vol.112, No. 459 pp.55-57, 2013.

◎ 국내 학술대회 발표논문

- [1] 손기준, 정장현, 장의훈, 한성조, 운영, “실리콘 기판상에서 제 2 그라운드를 가지는 박막필름 전송선로에 관한 연구와 RFIC에의 응용”, 2012년도 한국마린엔지니어링 후기학술대회 논문집, pp. 255, 2012. 10.
- [2] 손기준, 정장현, 장의훈, 한성조, 운영, “RFIC용 초소형 수동소자에의 응용을 위한 실리콘 박막필름상의 전송선로에 관한 연구”, 2012년도 한국전자과학회 종합학술대회 논문집, pp. 255, 2012. 10.
- [3] 손기준, 정장현, 한성조, 운영, “실리콘 RFIC상에서 제 2 그라운드 구조를 가지는 무선통신용 단파장 전송선로의 등가회로에 관한 연구”, 2013년도 한국통신학회 하계 종합학술대회 논문집, pp.285-286, 2013. 06.
- [4] 손기준, 정장현, 한성조, 운영, “제 2 의 그라운드를 가지는 RFIC용 전송선로에 관한 전송특성연구”, 2013년도 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp. 338, 2013. 06.
- [5] 손기준, 정장현, 한성조, 김정훈, 운영, “Thin-Film 전송선로의 대역폭 추출에 관한 연구”, 2013년도 한국전자과학회 종합학술대회 논문집, pp. 233, 2013. 12.
- [6] 손기준, 정장현, 김정훈, 운영, “RFIC상에서 초소형 통신 시스템에의 응용을 위한 Thin-Film을 이용한 전송선로의 손실특성에 관한 연구”, 2013년도 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp. 285, 2014. 06.
- [7] 손기준, 김동일, “박막형 ML/CPW 복합구조 단파장 전송선로의 손실특성에 관한 연구”, 2014년도 한국전자과학회 종합학술대회 논문집, pp. 44, 2014. 11.

감사의 글

제가 대학에 입학 후 지금까지 시간이 빠르게 흘러 대학원 생활을 마무리 하는 시점이 되었습니다. 대학원에 2년이라는 시간이 너무 빨리 지나가서 아쉬움이 남지만 저의 학위논문을 위해 부족한 저에게 많은 도움을 주셨던 분들께 작은 면을 빌어 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 지금의 제가 있기까지 끝까지 저를 지도해주신 운영 교수님께 감사의 말씀드립니다. 지금 비록 해외에 계시지만, 끝까지 책임감을 가지시고 저를 챙겨주신 고마움 잊지 않겠습니다. 그리고 저의 학위 논문을 위해 항상 변함없는 모습으로 세심하게 지도해주신 김동일 교수님의 모습 잊지 않으며 저에게 해주셨던 좋은 말씀 잊지 않고 사회에 나가 실천하며 교수님의 은혜에 보답하는 자랑스러운 제자가 되도록 노력하겠습니다. 또한, 본 논문의 부족한 점을 보완할 수 있도록 아낌없이 지도해주시고 많은 격려와 가르침을 주신 김홍승 교수님, 최동한 박사님께 진심으로 감사드리며, 언제나 열정과 사랑으로 학생들을 바른 길로 이끌어주신 조형래 교수님, 강인호 교수님, 정지원 교수님, 김기만 교수님, 민경식 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 연구실의 장으로써 저에게 많은 도움을 주신 장현 형님 감사드리고, 내년 박사 학위 논문 잘 마무리하시고 사회에서 자주 볼 수 있었으면 좋겠습니다. 그리고 나의 후배들 정훈이 수정이도 많이 도와줘서 늘 고맙게 생각하며 내가 많은 도움을 주지 못한 것 같아 맘에 걸리지만 잘 할 거라고 믿는다. 대학원 동기인 병철이형, 해찬이, 태훈이, 성민이 대학원 잘 마무리하도록 합시다. 그동안 수고하셨습니다.

마지막으로 지금 이 자리에 있기까지 저를 길러주신 할머니, 아버지, 어머니 정말 감사합니다. 그리고 나를 많이 도와준 동생아 고맙다. 나의 짝궁 소영이 나의 뒤에서 많이 도와주서 너무 고맙고 앞으로 잘 챙겨줄게. 우리가족, 여자친구 많이 많이 사랑하고 항상 자랑스러운 사람이 되겠습니다.

대학원 2년 생활을 하면서 다양한 경험들을 하면서 한 층 성장할 수 있었던 값진 경험이었습니다. 글을 마무리하면서 지금의 제가 여기에 서있기까지 함께 해준 모든 분들께 다시 한 번 감사의 마음을 전합니다. 사회에 나가 제가 배웠던 가르침과 노력을 잊지 않고 정진하는 손기준이 되겠습니다.