

工學碩士 學位論文

주기적으로 천공된 접지금속막 선로를 이용한
MMIC용 초소형 저임피던스 윌킨슨 전력분배기에
관한 연구

A study on a highly miniaturized and low impedance
Wilkinson power divider employing Periodically
Perforated Ground Metal on MMIC

指導教授 尹 榮

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電 波 工 學 科

金 忠 烈

本 論 文 을 金 忠 烈 의 工 學 碩 士
學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 安 壙 昊

委 員 : 工 學 博 士 閔 庚 植

委 員 : 工 學 博 士 尹 榮



2007 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

電 波 工 學 科

金 忠 烈

목 차

Nomenclature	iii
Abbreviations	iv
Abstract	v
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 내용	2
제 2 장 마이크로파 수동 기능회로 이론	4
2.1 월킨슨 전력분배기	4
2.2 MMIC 용 마이크로파 수동 기능회로	7
2.2.1 집중소자를 이용한 MMIC 용 마이크로파 수동 기능회로	7
2.2.2 단파장 선로를 이용한 MMIC 용 마이크로파 수동 기능회로	12
제 3 장 단파장 전송선로 제작 및 RF특성 평가	16
3.1 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로의 RF 특성 평가	16
3.1.1 PPGM 선로의 파장 축소 효과	16
3.1.2 PPGM 선로 파장의 용량성분(T) 의존성	18
3.1.3 PPGM 선로의 선로손실	19
3.1.4 PPGM 선로의 RF특성에 대한 SiN 두께 의존성	20
3.1.5 PPGM 선로의 Ground Condition 의존성	26
3.1.6 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로에 대한 RF 특성	27

3.2 PPGM 코프레이너 선로의 RF 특성 평가	29
3.2.1 코프레이너 형태의 PPGM 선로의 파장 감축효과	29
3.2.2 코프레이너 형태의 PPGM 선로의 선로손실	30
3.3 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로	33
3.3.1 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로의 RF 특성	33
3.3.2 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로 평가	35

제 4 장 MMIC용 초소형/저임피던스 single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 제작 및 평가	36
--	-----------

제 5 장 결 론	42
------------------------	-----------

참고문헌	45
-------------------	-----------

발표논문	47
-------------------	-----------

Nomenclatures

C	:	Capacitance
I	:	Current
J	:	Electric Conduction Current Density Vector
L	:	Inductance
R	:	Resistance
V	:	Voltage
Y	:	Admittance
Z	:	Impedance
Z₀	:	Characteristic Impedance
β	:	Phase Constant
ε	:	Permittivity
ε_0	:	Permittivity of Vacuum
ε_{eq}	:	Equivalent Permittivity
λ	:	Wavelength
f	:	Frequency
ω	:	Angular velocity

Abbreviations

MMIC : Monolithic Microwave Integrated Circuit

HIC : Hybrid Integrated Circuit

SoC : System On Chip

PPGM : Periodically Perforated Ground Metal

DBS : Direct Broadcasting Satellite

DMB : Digital Multimedia Broadcasting

LMDS : Local Multipoint Distribution System

RFID : Radio Frequency Identification

UWB : Ultra-Wide Band

PBG : Photonic Band-Gap

DGS : Defected Ground Structure

ABSTRACT

A study on a highly miniaturized and low impedance Wilkinson power divider employing Periodically Perforated Ground Metal on MMIC

RF components dealing with high frequency signals are most important in wireless communication system and the performance of the system depends on them. In order to realize highly miniaturized and fully integrated MMICs, the development of miniaturized on-chip passive components is indispensable. The development of miniaturized on-chip passive components with low port impedances will especially greatly reduce the size of MMICs by removing bulky impedance transformation circuits between the passive components and low-impedance FETs; generally, the input and output impedances of the FETs are much lower than 50Ω in the RF frequency. Therefore, impedance transformation circuits should be employed for impedance matching between 50Ω - based passive components and low-impedance FETs [1-5]. However, in case of fabricating low impedance line using the conventional microstrip with ground metal on the backside of GaAs substrate, the width of the line becomes very large. For instance, when making 15Ω line on the GaAs substrate with $100 \mu\text{m}$ height, the width of the line reaches $800 \mu\text{m}$.

In this work, using PPGM structure with single-sided via holes, we developed a low-impedance and highly miniaturized Wilkinson power divider on MMIC. Also, using the microstrip line with PPGM, highly miniaturized passive components were fabricated on GaAs MMIC. The novel microstrip line structure exhibited much lower characteristic impedance and shorter

guided-wavelength than conventional one. Using the novel microstrip line with PPGM, various passive components such as transmission line and stub were fabricated, and their RF characteristics were investigated. For a comparison, we also investigated the characteristics of the Thin Film structure whose perfect ground is located at the place of PPGM (In other words, perfect ground is located at the interface between the SiN film and GaAs substrate). The novel microstrip line employing PPGM can be applicable to a development of highly miniaturized and low impedance passive circuits, which will integrate bulky passive components such as hybrid coupler/divider and $\lambda/4$ bias line on MMICs.

Finally, highly miniaturized and low impedance on-chip Wilkinson power divider employing PPGM structure with single-sided via holes was fabricated on GaAs MMIC. Its size was 0.117 mm^2 , which was 6 % of the conventional one. Equal power division characteristics were observed from the power divider. The power divider showed insertion loss values lower than 5.5 dB and isolations values higher than 7.5 dB from 4.5 to 6.0 GHz.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 SoC (System on Chip)화에 따른 단말기의 소형화, 고집적화가 RF 단말기 시장에서 요구되고 있으며, 추후 RF 단말기 시장에서의 RF 송수신단은 수동소자를 다량 집적한 고집적 SoC 형 단말기가 요구되어지고 있는 추세이다. 따라서 이를 위한 수동소자의 초소형화 기술은 매우 중요하며, 선로자체의 파장이 축소된 형태의 단파장 선로 개발이 절실한 실정이다. 그러나 기존의 Π 형 회로, PBG 구조 및 DGS 구조는 선로의 고임피던스화, 특성임피던스의 주파수 의존성, 공진구조에 의한 삽입손실의 증가 등의 문제점이 존재한다. 또한 기존의 일반적인 회로의 경우 RF 송수신단에서의 저잡음 증폭기를 제외하고는, 적어도 $100\ \mu\text{m}$ 이상의 게이트 폭(Wg)을 가지는 FET (Field Effect Transistor)가 사용되는데 이러한 GaAs FET 는 보통 $10\sim 25\ \Omega$ 의 낮은 게이트 입력임피던스를 가지며, 따라서 회로구성을 간략화하기 위해서는 FET 입력부에 $10\sim 25\ \Omega$ 의 저임피던스 선로로 제작된 전력결합/분배기 또는 하이브리드 등이 필요하다[1-4]. 하지만 GaAs 기판 뒷면에 접지금속막을 가지는 종래의 마이크로스트립 선로를 이용하여 $30\ \Omega$ 이하의 특성임피던스 선로를 제작하는 경우 선로 폭이 매우 커지는 문제점이 있다. 예를 들어 $100\ \mu\text{m}$ 의 높이를 가지는 GaAs 기판상에 $20\ \Omega$ 선로를 제작하는 경우 선로 폭은 약 $400\ \mu\text{m}$ 가 되며, $15\ \Omega$ 선로를 제작하는 경우 선로 폭은 약 $800\ \mu\text{m}$ 이 된다. 따라서 종래의 마이크로스트립 선로를 이용하는 경우, 전력결합/분배기 또는 하이브리드, 임피던스 변환기 등의 수동소자를 MMIC 상에 집적하는 것은 실질적으로 불가능하며, 그 결과 아주 큰 면적의 수동소자들이 MMIC 가 실장 된 프린트 기판 상에 제작된다[1-4]. 이러한 문제점들은 MMIC 실장 모듈면적의 증가와 모듈실장 가격 증가의 원인이 된다. 상기 문제점을 해결하기 위해서, 주기적 홀을 가지는 접지금속막 선로구조가 발표되었으며, 이러한 구조의 선로는 단파장 특성과 저임피던스 특성을 보여준다[5].

따라서 본 논문에서는 임피던스의 주파수 의존성이 존재하지 않는, 그리고, 공진구조에 의한 삽입손실의 증가 등의 문제점이 존재하지 않는 MMIC 제작에 적합한 단파장 선로를 설계·제작 및 RF 특성을 평가하고 이를 이용한 MMIC 용 초소형 저임피던스 단면접지 구조의 Wilkinson power divider 를 개발하고자 한다.

1.2 연구 내용

최근, GaAs 디바이스 제조 기술의 발전과 더불어 수동소자 및 능동소자들이 저가격화, 고집적화, on-chip 화가 이루어지고 있다. 그러나 MMIC 상에서 기존의 수동소자는 능동소자에 비해 특성임피던스, 크기 등의 여러 문제점으로 인하여 on-chip 화에 많은 어려움을 가지고 있다. 즉 종래의 수동소자는 MMIC 상에서 패키징 (packaging) 이 안 된 bare chip MMIC 이며, 그리고, 패키징된 MMIC 의 경우도 전부 표면실장 패키지 (surface mount package) 상에서 본딩 와이어 (bonding wire) 에 의해 MMIC 가 실장 된 형태가 대부분이었다. 이러한 표면실장 패키지는 패키징된 MMIC 칩 면적을 상당히 증가시키며, 패키지 내부에 존재하는 리드프레임 (leadframe) 과 본딩 와이어 (bonding wire) 에 기인하는 기생인덕터 (parasitic inductor) 로 인하여 MMIC 칩의 RF 특성을 저하시키며, 특히 Ku 밴드 이상의 주파수 대역에서는 아주 심각하다. 또한 이러한 패키징 방법으로 인하여 MMIC 실장 모듈면적과 모듈실장 코스트를 크게 증가시키는 원인이 되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 패키지 면적이 MMIC 와 동일하며, MMIC 의 패키징 실장에 있어서 본딩 와이어와 리드프레임을 사용하지 않는 고집적화 on-chip 화 MMIC 기술이 요구되고 있다[7-9]. 이런 이유로 본 논문에서는 수동소자의 on-chip 화를 위해 기존에 발표되었던 주기적 접지금속막 구조의 선로를 설계하고 RF 특성을 평가하여, 이를 MMIC 용 초소형 수동소자 개발에 응용하고자 하며, 아래와 같이 단파장 선로의 설계·제작 및 RF 특성을 평가하여 초소형 저임피던스 on-chip 단면접지 구조의 Wilkinson power divider 를 개발하였다.

- (1) 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로 설계 및 RF 특성 평가
- (2) 코프레너 형태의 PPGM 선로 설계 및 RF 특성 평가
- (3) 마이크로스트립 선로 형태의 PPGM 선로의 SiN 높이 의존성에 대한 RF 특성 평가
- (4) 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 선로 설계 및 RF 특성 평가
- (5) PPGM 선로 구조를 이용한 MMIC 용 초소형/저임피던스 single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 개발

본 논문의 PPGM 구조를 이용한 수동소자의 on-chip 화 기술은 향후 MMIC 무선통신소자에 대한 고집적화 및 초소형화 기술향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

제 2 장 마이크로파 수동 기능회로 이론

마이크로파 수동 기능회로에는 90° 및 180° 하이브리드 브랜치라인 커플러와 레트레이스가 있으며, 전력 분배회로로서 사용되는 윌킨슨 전력분배기가 있다. 이들은 믹서 및 전력증폭기 등에서 신호의 합성 및 위상분배회로로서 널리 사용된다. 이들 회로는 대부분 $\lambda/4$ 파장을 기본으로 설계되어 있으므로, MMIC 혹은 HIC 상에서 RF 능동회로에 비해 아주 큰 면적을 차지한다. 따라서 일반적으로는 MMIC 외부의 프린트기판 상에 제작되나, 최근에는 축소된 형태의 수동 기능회로가 MMIC 상에 제작되고 있다.

2.1 윌킨슨 전력분배기

그림 2.1은 마이크로스트립 선로로 구현된 윌킨슨 전력분배기의 기본구조를 보여준다. 윌킨슨 전력분배기는 동위상 전력분배 특성과 전력결합 특성을 가진다. 예를 들면, 포트 1 에 입력신호를 가하는 경우, 포트 2 와 포트 3 에서 출력되는 신호는 서로 동위상, 동전력 특성을 가진다. 그리고 포트 2 와 3 에 동위상의 입력신호를 가하는 경우, 포트 1 에서는 2 배의 전력이 출력된다. 반면 포트 2 와 3 은 서로 절연되어 있다. 이를 S 파라미터 관계식으로 표현하면 식 (2.1.1)~(2.1.3) 과 같이 표현될 수 있다.

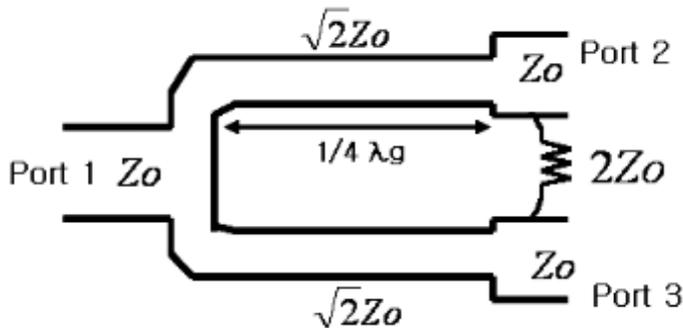


그림 2.1 윌킨슨 전력분배기

Fig. 2.1 Wilkinson power divider

$$\text{Mag}(S_{21}) = \text{Mag}(S_{31}) \quad (2.1.1)$$

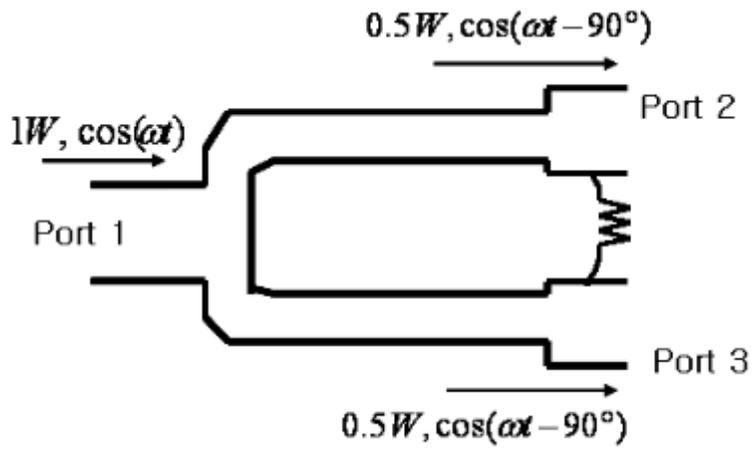
$$\text{Phase}(S_{21}) = \text{Phase}(S_{31}) \quad (2.1.2)$$

$$\text{Mag}(S_{23}) = 0 \quad (2.1.3)$$

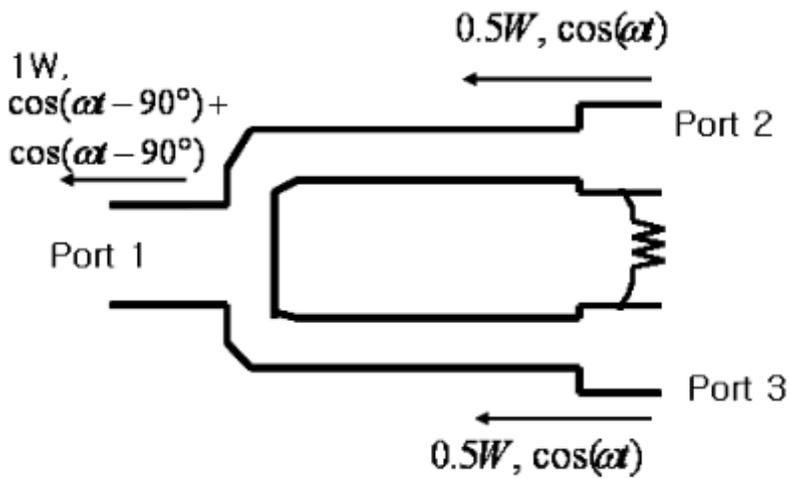
상기 식으로 부터 S 파라미터 관계식과 무손실 수동소자에 관한 S 파라미터 기본성질로부터 월킨슨 전력분배기의 S 파라미터를 구하면 다음과 같다.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1.4)$$

식 (2.1.1) ~ (2.1.4) 로부터 월킨슨 전력분배기의 입출력 신호의 전력과 위상에 관한 분배 및 결합특성은 그림 2.2 와 같이 설명된다. 그림 2.2 (a) 와 같이, 포트 1 에 1 W 의 전력을 가지는 신호 $\cos(\omega t)$ 를 입력하면, 0.5 W 의 전력을 가지며 동위상인 두 개의 신호 $\cos(\omega t - 90^\circ)$ 가 포트 2 와 3 에서 출력되고, 그림 2.2 (b) 와 같이, 0.5 W 의 전력을 가지며 동위상인 두개의 신호 $\cos(\omega t)$ 를 포트 2 와 3 에 입력시키면, 포트 1 에서는 동위상 결합되어 1 W 의 전력을 가지는 신호 $\cos(\omega t - 90^\circ)$ 가 출력된다. 이와 같은 기능을 가지는 월킨슨 전력분배기는 여러 개의 증폭기를 병렬 접속한 고효율 전력증폭기에서 증폭기간 전력결합 및 분배소자로서 널리 사용된다[10-11].



(a)



(b)

그림 2.2 (a) 윌킨슨 전력분배기의 전력분배 특성

(b) 윌킨슨 전력분배기의 전력결합 특성

Fig. 2.2 (a) Power division characteristic of Wilkinson power divider

(b) Power combination characteristic of Wilkinson power divider

2.2 MMIC 용 마이크로파 수동 기능회로

2.2.1 집중소자를 이용한 MMIC 용 마이크로파 수동 기능회로

레트레이스, 브랜치라인 커플러, 그리고 윌킨슨 전력분배기 등은 모두 $\lambda/4$ 파장을 기본으로 구성되어 있으므로 그 사이즈가 매우 크다. 따라서 이들은 MMIC 내부에 집적하기는 어려우므로 MMIC 외부의 프린트기판 상에 제작된다. 이러한 수동 기능회로를 MMIC 내부에 집적하기 위해서는 소형화된 형태의 수동 기능회로가 요구된다. 그림 2.3 과 그림 2.4 는 MMIC 용으로 사용되는 대표적인 소형 수동 기능회로를 보여준다.

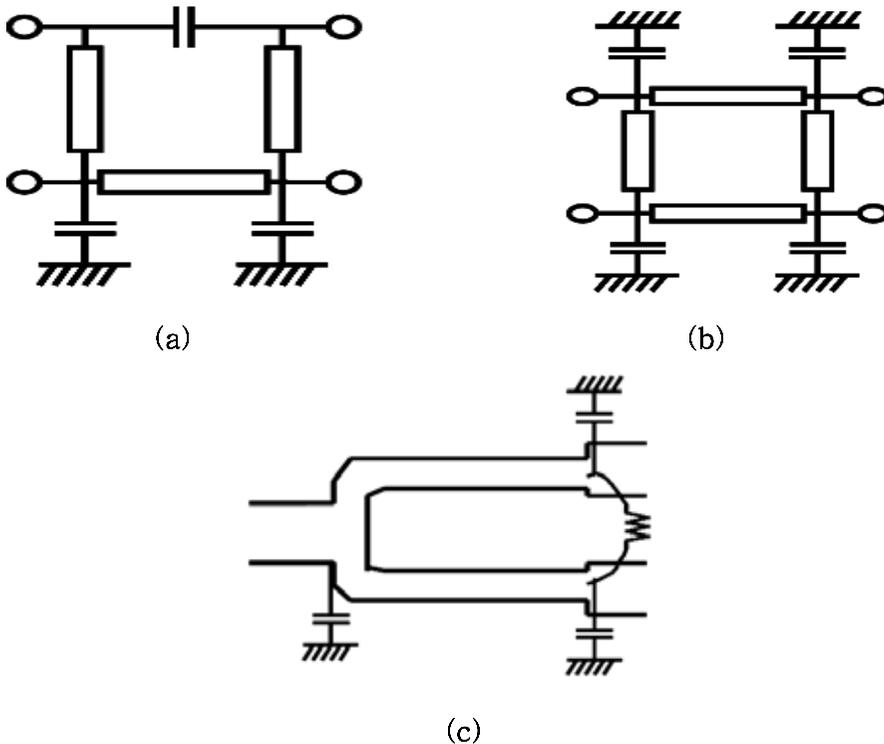


그림 2.3 (a) 소형 레트레이스, (b) 소형 브랜치라인 커플러,
(c) 소형 윌킨슨 전력분배기

Fig. 2.3 (a) Miniaturized Ratrace, (b) Miniaturized Branch line coupler,
(c) Miniaturized Wilkinson power divider

그림 2.3 은 전송선로와 병렬 커패시터를 이용한 소형 수동 기능회로이며, 그림 2.4 는 집중소자로만 구성된 소형 수동 기능회로이다. 그림 2.4 와 같이 집중소자로만 구성된 수동 기능회로는 인덕터를 포함하며 이들은 GaAs MMIC 상에서 스파이럴 인덕터에 의해 구현된다. 그러나 스파이럴 인덕터는 다량의 기생성분을 함유하며, 이러한 기생성분에 의해 스파이럴 인덕터는 특정 주파수에서 자기공진 특성을 나타낸다. 이러한 자기공진 특성은 대역제거 필터의 제작에 이용되기도 하지만 일반적으로는 고주파 성능에 악영향을 미치므로 스파이럴 인덕터는 자기공진 주파수 이하의 대역에서만 사용된다. 따라서 그림 2.4 와 같은 구조의 소형 수동 기능회로는 대략 5 GHz 이하의 대역에서 주로 사용된다. 이와 같은 이유로 그림 2.3 과 같이 전송선로와 병렬 커패시터에 의해 구현된 소형 수동 기능회로가 제안되었으며, 이들은 Ku 밴드 이상의 대역에서 주로 이용된다. 그림 2.3 과 같이 전송선로와 병렬 커패시터에 의해 수동 기능회로가 구현되는 경우 그 사이즈가 줄어드는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 그림 2.5 (a) 는 길이가 $\lambda/4$ 인 전송 선로이며 이는 수동 기능회로를 이루는 단위선로이다. 그런데 그림 2.5 (b) 의 회로망에 대한 선로 임피던스 Z 와 병렬 커패시턴스 C 값을 적절히 선택하면, 그림 2.5 (b) 의 회로망과 그림 2.5 (a) 의 $\lambda/4$ 전송선로는 동일한 회로망 계수 값을 가지게 되며 이 경우 그림 2.5 (b) 의 회로망에 포함된 전송선로의 길이 l 은 $\lambda/4$ 보다 적은 값을 갖는다 [10-11].

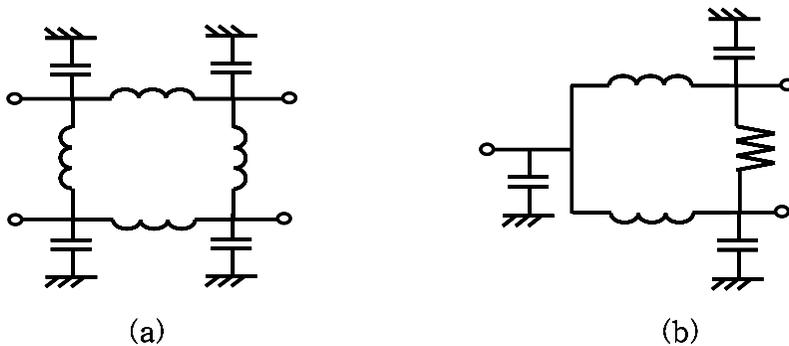
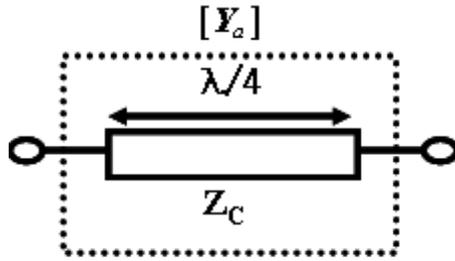
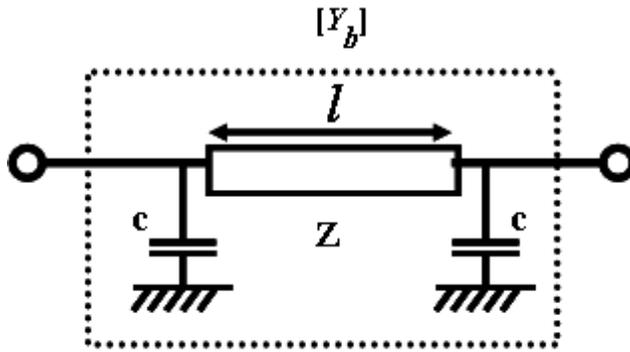


그림 2.4 (a) 소형 브랜치라인 커플러, (b) 소형 윌킨슨 전력분배기

Fig. 2.4 (a) Miniaturized Branch line coupler, (b) Miniaturized Wilkinson power divider



(a)



(b)

그림 2.5 (a) $\lambda/4$ 전송선로, (b) 등가의 2 포트 회로망

Fig. 2.5 (a) $\lambda/4$ transmission line, (b) Equivalence 2 port circuit

2 포트 $[Y]$ 파라미터를 이용하여 이를 설명하면 다음과 같다. 식 (2.2.1)로부터 그림 2.5 (a)의 $\lambda/4$ 전송선로에 대한 임피던스 행렬을 구하면 식 (2.2.2)이며,

$$[Z] = \begin{bmatrix} -jZ_0 \cot \beta l & \frac{1}{jY_0 \sin \beta l} \\ \frac{1}{jY_0 \sin \beta l} & -jZ_0 \cot \beta l \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

$$[Z_a] = \frac{1}{jY_c} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

역행렬을 취하여 어드미턴스 행렬을 구하면 식 (2.2.3) 과 같이 된다.

$$[Y_a] = \frac{1}{jZ_c} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

또한, 종속 접속 회로망에 대한 ABCD 파라미터 계산 방법을 이용하여 그림 2.5 (b) 의 2 포트 회로망에 대한 ABCD 파라미터를 구하면

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ \sin \beta l \\ \frac{j \sin \beta l}{Z} & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j\omega C & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.4)$$

이 된다. 식 (2.2.4) 의 어드미턴스 행렬을 구하면

$$[Y_b] = \begin{bmatrix} \frac{\cos \beta l}{jZ \sin \beta l} + j\omega C & \frac{-1}{jZ \sin \beta l} \\ \frac{-1}{jZ \sin \beta l} & \frac{\cos \beta l}{jZ \sin \beta l} + j\omega C \end{bmatrix} \quad (2.2.5)$$

이 된다. 여기서 식 (2.2.3) 과 식 (2.2.5) 로부터 어드미턴스 행렬 $[Y_a]$ 와 $[Y_b]$ 가 같게 되는 조건을 구하면,

$$Z = \frac{Z_c}{\sin \beta l} \quad (2.2.6)$$

$$\omega C = \frac{\cos \beta l}{Z_c} \quad (2.2.7)$$

이 된다. 즉, 식 (2.2.6), (2.2.7) 을 만족하도록 그림 2.5 (b) 의 회로망에 대한 선로 임피던스 Z 와 병렬 커패시턴스 C 값을 적절히 선택하면, 그림 2.5 (b) 의 회로망과 그림 2.5 (a) 의 $\lambda/4$ 전송선로는 동가가 된다. 이와 같이, 전송선로와 병렬 커패시터를 이용하면 MMIC 상에 집적 가능한 소형화된 수동 기능회로를 제작할 수 있다. 그러나 이러한 소형 수동 기능회로의 단점은 사이즈가 줄어드는 반면, 선로의 특성 임피던스가 증가한다는 점이다. 이는 식 (2.2.6) 에 기인하며, 예를 들면, 포트 임피던스가 50Ω 이고, 선로의 길이가 $1/12$ 인 경우, 윌킨슨 전력분배기를 구성하는 선로의 특성 임피던스는 141.4Ω 이다. 그러나 GaAs MMIC 상의 마이크로스트립 선로에 대한 특성 임피던스는 최대 100Ω 정도까지 실현가능하며, 그 이상의 특성 임피던스를 가지는 선로를 제작하는 것은 불가능하다. 따라서 이러한 제약 때문에 브랜치라인 커플러와 윌킨슨 전력분배기에 대한 선로길이를 각각 $1/12$ 과 $1/8$ 정도까지만 축소시킬 수 있으므로 소형화에 다소 한계가 있다.

2.2.2 단파장 선로를 이용한 MMIC 용 마이크로파 수동 기능회로

단파장을 가지는 마이크로스트립 선로를 이용함으로써 소형의 MMIC 용 수동 기능회로를 제작할 수 있다. 그림 2.6 은 종래의 마이크로스트립 선로구조를 보여주며, 용량 C_a 는 선로와 GaAs 기판의 접지금속막사이의 단위 길이당 용량에 해당한다. 식 (2.2.8) 로부터 이러한 마이크로스트립 선로를 포함한 모든 전송선로의 선로파장 λ 는 식 (2.2.9) 로 표현된다[1-4].

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2.2.8)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{LC}} \quad (2.2.9)$$

상기 식에서 용량 C 는 선로와 GaAs 기판의 접지금속막사이의 단위 길이당 용량 (예를 들면, 그림 2.6 의 종래의 선로구조의 경우에는 C_a 에 해당) 에 해당하며, 인덕턴스 L 은 선로의 단위 길이당 인덕턴스 값에 해당하며, 그리고 f 는 동작주파수이다. 상기 식에서 알 수 있는 바와 같이 선로와 접지금속막 사이의 용량 C 가 증가할수록 선로파장 λ 는 감소한다. 이 점에 주목하여, 마이크로스트립 선로와 GaAs 기판 뒷면의 접지금속막 사이에 사다리형의 주기적 접지금속막을 삽입하여 선로의 용량성분 C 를 증가시킨 새로운 형태의 전송선로가 제안되었고, 그림 2.7 은 주기적 접지금속막 마이크로스트립 선로구조를 보여주며 그림 2.7 (b) 는 그림 2.7 (a) 의 X-X 방향에 대한 단면구조이다, 그림에서 보는 바와 같이 선로와 GaAs 기판의 접지금속막 사이에 주기적 접지금속막을 삽입하였으며, 그리고 주기적 접지금속막은 비어 홀을 통해서 GaAs 기판의 접지금속막에 연결되어 접지전위를 공급한다. 주기적 접지금속막과 선로 사이에는 SiN 박막을 삽입하였다. 그림 2.7 (c) 는 그림 2.7 (a) 의 Y-Y 방향에 대한 단면구조이다.

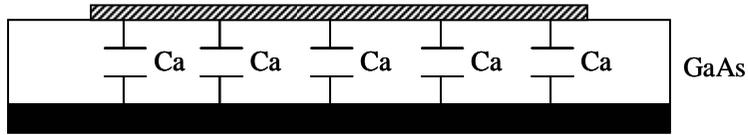


그림 2.6 종래의 마이크로스트립 선로구조
 Fig. 2.6 Conventional microstrip line structure

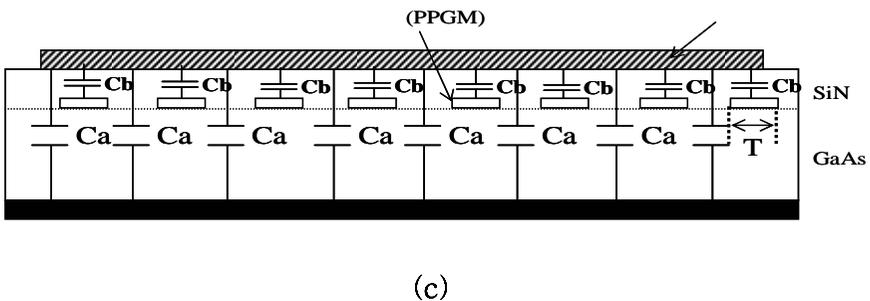
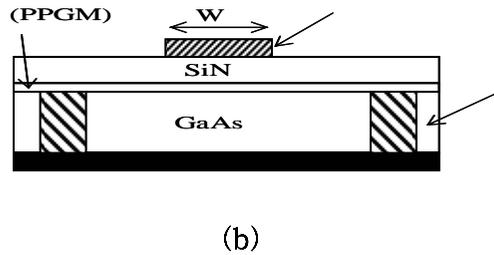
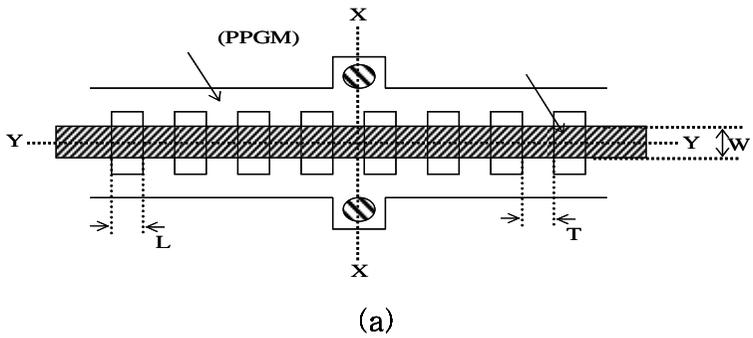


그림 2.7 (a) 주기 접지금속막 마이크로스트립 선로구조,
 (b) X-X 방향에 대한 단면구조, (c) Y-Y 방향에 대한 단면구조
 Fig.2.7 (a) PPGM structure, (b) A cross-sectional view according to X-X
 direction, (c) A cross-sectional view according to Y-Y direction

그림 2.7 (c) 에서 알 수 있는 바와 같이 주기적 접지금속막 선로구조의 단위 길이당 용량의 경우, 종래의 마이크로스트립 선로구조에서 존재하는 용량 C_a 뿐만 아니라 주기적 접지금속막과 선로사이의 용량 C_b 가 추가적으로 존재한다. 따라서 그림 2.6 의 종래의 선로구조의 경우 식 (2.2.9) 의 용량부 $C=C_a$ 이지만, 그림 2.7 의 주기적 접지금속막 선로에 대해서는 $C=C_a+C_b$ 가 된다. 따라서 그림 2.6 의 종래의 선로구조에 대한 선로파장은

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{LC_a}} \quad (2.2.10)$$

이며, 그림 2.7의 주기적 접지금속막 선로에 대한 선로파장은

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{L(C_a + C_b)}} \quad (2.2.11)$$

가 되어, 주기적 접지금속막 선로의 경우, 추가적인 용량 C_b 에 의해 선로파장이 감소하게 된다. 그림 2.7 의 선로두께 T , 선로간격 L , SiN 두께를 조절하면 주기적 접지금속막과 선로사이의 용량 C_b 를 쉽게 변화시킬 수 있으며, 그 결과 λ 의 크기를 조절할 수 있다. 20 GHz 에서의 선로파장과 특성 임피던스에 대한 측정결과가 표 2-1 에 요약되어 있다. 20 GHz 에서의 측정 결과에 의하면, 선로 폭 W 가 20 μm 인 종래의 선로의 경우에는 선로파장이 5.6 mm 인 반면, 선로 폭 W 가 20 μm 인 주기적 접지금속막 선로의 경우에는 선로파장이 2.2 mm 밖에 되지 않는다. 따라서 주기적 접지금속막 선로구조를 이용하면, 선로 파장의 감소에 의해 MMIC 용 수동소자의 사이즈를 대폭 축소할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 표 2-1 에서 보는 바와 같이 주기적 접지금속막 선로는 단파장 특성뿐만 아니라 저임피던스 특성도 보여주고 있다[10-11].

표 2-1 GaAs MMIC 상에 제작된 마이크로스트립 선로에 대한 20 GHz
에서의 선로파장과 특성임피던스

	Z_0	λ
Conventional microstrip line	70 Ω	5.6 mm
PPGM structure	15 Ω	2.2 mm

이는 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스 식이 다음과 같이 선로의 용량에 반비례하기 때문이다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2.12)$$

이러한 결과는 MMIC 상의 수동소자 제작에 매우 유리한 점으로 작용한다. 왜냐하면, 일반적으로 RF 송수신단에서는 저잡음 증폭기를 제외하고는, 적어도 100 μm 이상의 게이트폭 (W_g) 을 가지는 FET 가 사용되며, 이러한 FET 는 보통 10~25 Ω 정도의 낮은 입출력 임피던스를 가지므로 회로구성을 간략화하기 위해서는 FET 입력부에 10~25 Ω 의 저임피던스 선로로 제작된 MMIC 용 수동소자가 필요하기 때문이다. 그러나 표 2-1 에서 보는 바와 같이 종래의 선로구조를 이용하면 이러한 저임피던스 선로를 제작할 수 없으므로, 종래의 선로구조를 이용하여 제작된 MMIC 용 수동소자는 FET 의 입출력부 임피던스보다 훨씬 높은 포트 임피던스를 가지며, 따라서, MMIC 용 수동소자와 FET 입출력부사이의 임피던스 정합을 위해서 별도의 정합회로가 필요하게 된다. 그러나 표 2-1 에서 보는 바와 같이 주기적 접지금속막 선로는 저임피던스 특성을 가지며, 따라서 주기적 접지금속막 선로에 의해 제작된 MMIC 용 수동소자도 낮은 포트 임피던스를 가지므로 MMIC 용 수동소자와 FET 사이에는 별도의 정합회로가 필요 없게 된다.

제 3 장 단파장 전송선로 제작 및 RF 특성 평가

본 장에서는 단파장선로의 RF 특성에 관해 고찰하고자 한다. 즉 단파장 선로의 파장 축소 효과, 파장의 용량성분 의존성, 선로손실 및 선로손실의 용량 성분 의존성, 선로손실의 Ground Condition 의존성, 선로손실의 SiN 두께 의존성, 그리고 단파장 선로의 코프레이너 형태, 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 선로 설계 및 RF 특성을 평가한다.

3.1 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로의 RF 특성 평가

3-1-1 PPGM 선로의 파장 축소 효과

PPGM 구조를 사용하는 경우와 종래의 마이크로스트립 선로의 파장을 비교하여 PPGM 선로의 파장 축소 효과를 고찰한다. 그림 3.1 은 PPGM 구조의 길이 $500\ \mu\text{m}$, 용량 성분(T) $5\ \mu\text{m}$ 인 마이크로스트립 선로 형태로 설계된 PPGM의 레이아웃이고, 그림 3.2 는 온 웨이퍼 상에 제작된 사진을 보여준다.

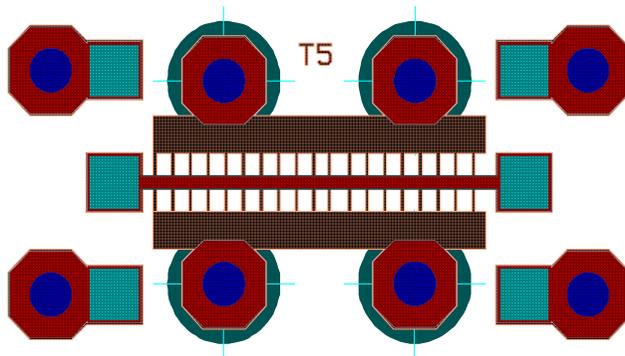


그림 3.1 PPGM 구조의 마이크로 스트립 선로

Fig. 3.1 PPGM microstrip line structure

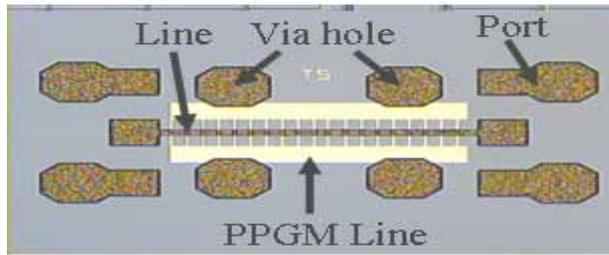


그림 3.2 은 웨이퍼 상에 제작된 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로
 Fig. 3.2 A photograph of the PPGM microstrip line structure

또한 그림 3.3 은 선로 폭(W) 이 $20\ \mu\text{m}$ 인 종래의 마이크로스트립 선로와 그림 3.1 에 보여 지는 PPGM 구조를 이용한 선로의 용량성분(T) 값을 $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, Thin Film 형태로 변화하여 각각의 파장을 비교한 그래프이다. 그림 3.3 에서와 같이 PPGM 을 사용하는 경우, 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 21.3 % 로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 예를 들면, 주파수 60 GHz 에서 PPGM 구조인 경우 파장(λ) 은 $0.37\ \text{mm}$ (PPGM, $T=5\ \mu\text{m}$) 이고, 종래의 마이크로 스트립선로의 경우 파장(λ)은 $1.74\ \text{mm}$ (선로 폭(W) $20\ \mu\text{m}$) 이다.

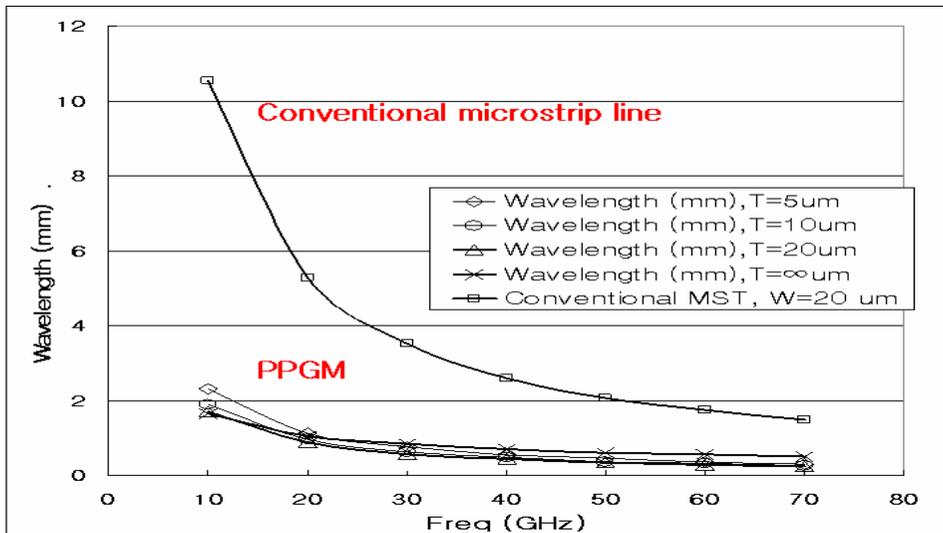


그림 3.3 PPGM 구조의 선로와 종래의 마이크로 스트립 선로의 파장비교
 Fig. 3.3 The wavelength of conventional microstrip line and PPGM structure

3-1-2 PPGM 선로 파장의 용량성분(T) 의존성

그림 3.4 는 PPGM 선로의 단면 구조를 보여준다. 그림에서와 같이 선로의 용량성분 T 를 변화하였을 때 ($T= 5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}, \text{Thin Film}$) PPGM 선로 파장의 용량성분 의존성에 대해 고찰한다. 그림 3.5 는 PPGM 선로의 용량성분 T 의 변화에 따른 주파수대 별 파장을 보여주는 그래프이다. 먼저 용량성분 T 가 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 로 변화하는 경우 T 가 커질수록 파장이 감소한다. 그러나 주기적 홀이 없는 경우, 즉 Thin Film 의 용량성분 T 가 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 로 변화할 때에는 파장이 더 크다. 이는 주기구조가 아니며, 따라서 slow-wave 가 존재하지 않기 때문이다.

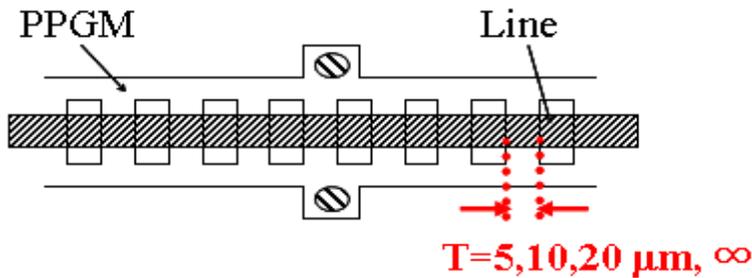


그림 3.4 PPGM 선로의 단면도

Fig. 3.4 A microstrip line structure employing PPGM

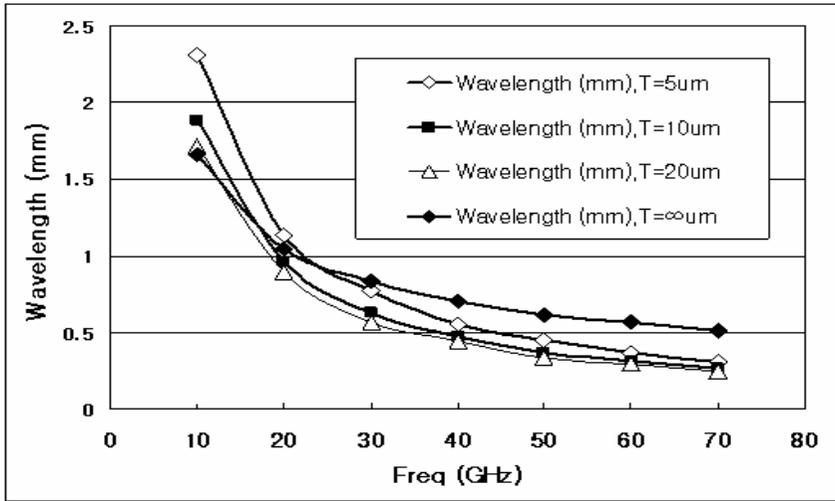


그림 3.5 용량성분 T의 변화에 대한 주파수대 별 파장비교

Fig. 3.5 The dependency of wavelength on T

3-1-3 PPGM 선로의 선로손실

표 3-1 은 용량성분 T 가 $5 \mu\text{m}$, 선로 길이 0.5 mm 인 PPGM 선로에 대한 주파수대 별 선로손실을 보여준다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 20 GHz 이하에서 약 -1 dB 의 손실을 보인다. 따라서 PPGM 선로를 20 GHz 대역에서의 정합소자로써 사용하기에는 큰 무리가 없음을 확인할 수 있다.

표 3-1 용량성분 T 가 $5 \mu\text{m}$, 선로 길이 0.5 mm 인 PPGM 선로에 대한 주파수대 별 선로손실

Freq (GHz)	손실 (dB/0.5 mm)
10	-0.397
20	-1.353
30	-2.494
40	-3.078
50	-7.324
60	-6.084
70	-14.23

3-1-4 PPGM 선로의 RF 특성에 대한 SiN 두께 의존성

본 절에서는 PPGM 선로의 SiN (실리콘나이트라이드) 즉 유전체의 두께를 100 ~ 700 nm 까지의 변화에 따른 PPGM 선로의 파장변화와 선로손실, 최대 손실에 대한 평가를 통해 가장 적합한 SiN 두께를 결정하고자한다. 이를 위해 60 GHz 대역의 RF 특성 분석을 평가하였다. 그림 3.6 은 SiN 두께를 100 ~ 700 nm 로 변화하였을 때의 주파수대 별 파장변화를 보여 준다. 그림에서와 같이 SiN 두께가 커질수록 파장이 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 60 GHz 대역을 예로 들면 그림 3.7 과 같이 주파수대역 60 GHz 일 때의 SiN 두께 변화에 대한 선로손실 특성을 보면 선로의 길이가 0.5 mm 인 PPGM 선로에 대해 SiN 두께가 100 nm 인 경우 선로의 손실은 60 GHz 대역에서 약 -4.9 dB 정도이나, SiN 두께가 400 ~ 600 nm 범위에서 주파수대역 60 GHz 일 때 선로 손실이 최소가 되며, 이 경우 선로손실은 약 -1.05 ~ -1.50 dB 이다. 이 결과로부터 SiN 두께가 400 - 600 nm 일 때가 가장 특성이 좋은 것을 확인할 수 있다.

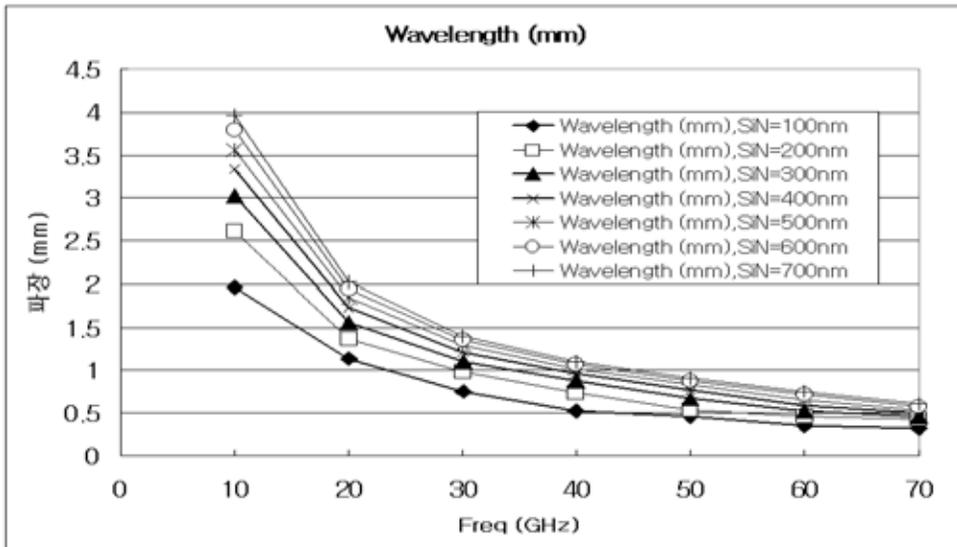


그림 3.6 SiN 두께 (100 ~ 700 nm) 변화에 대한 주파수대 별 파장변화

Fig. 3.6 The dependency of wavelength on SiN thickness

60GHz 손실 특성

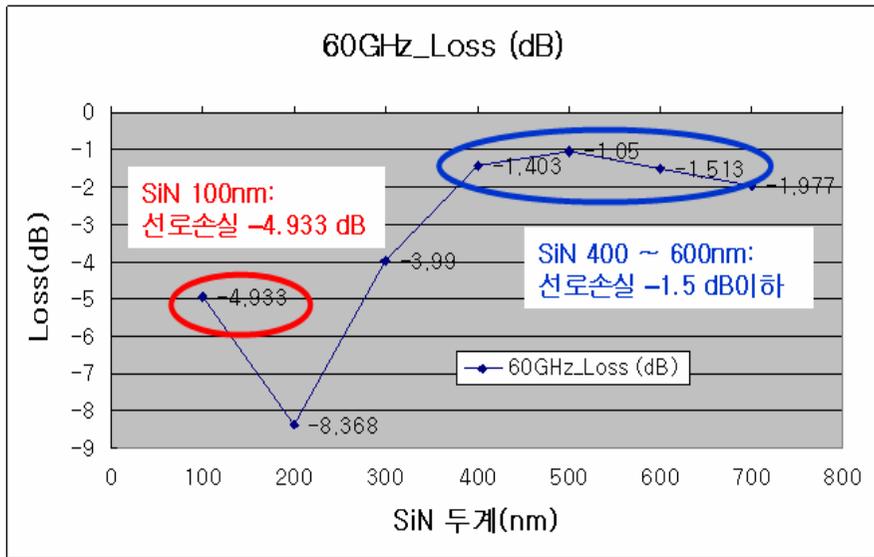


그림 3.7 60 GHz 대역의 SiN 두께 (100 ~ 700 nm) 변화에 대한 선로손실

Fig. 3.7 The dependency of insertion loss on SiN thickness (60 GHz)

60GHz 파장 특성

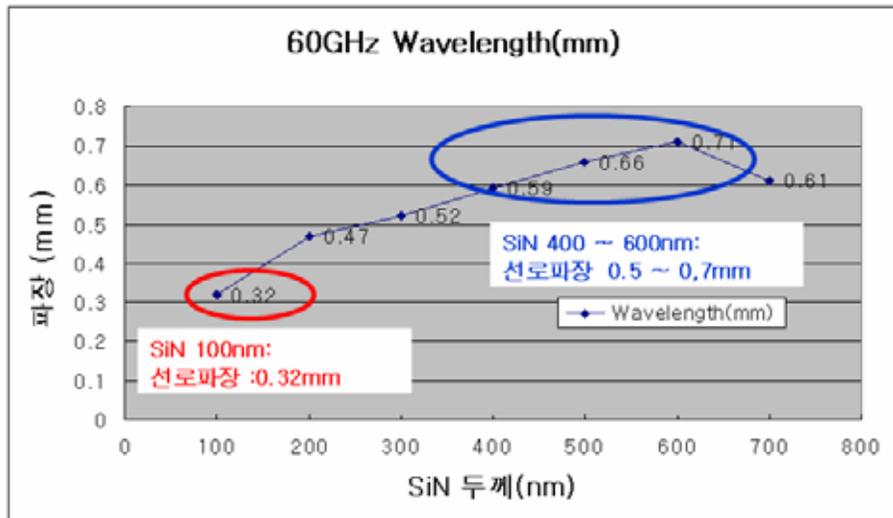


그림 3.8 60 GHz 대역의 SiN 두께(100 ~ 700 nm) 변화에 대한 선로파장

Fig. 3.8 The dependency of wavelength on SiN thickness (60 GHz)

또한 그림 3.8 은 주파수대역 60 GHz 일 때의 SiN 두께 변화에 대한 선로 파장을 보여준다. 그림과 같이 선로의 길이가 0.5 mm 인 PPGM 선로에 대해, SiN 두께가 100 nm 인 경우 선로의 파장은 60 GHz 대역에서 0.32 mm 이고 SiN 두께가 400 ~ 600 nm 범위에서 주파수대역 60 GHz 일 때 선로파장은 0.5 ~ 0.7 mm 이다.

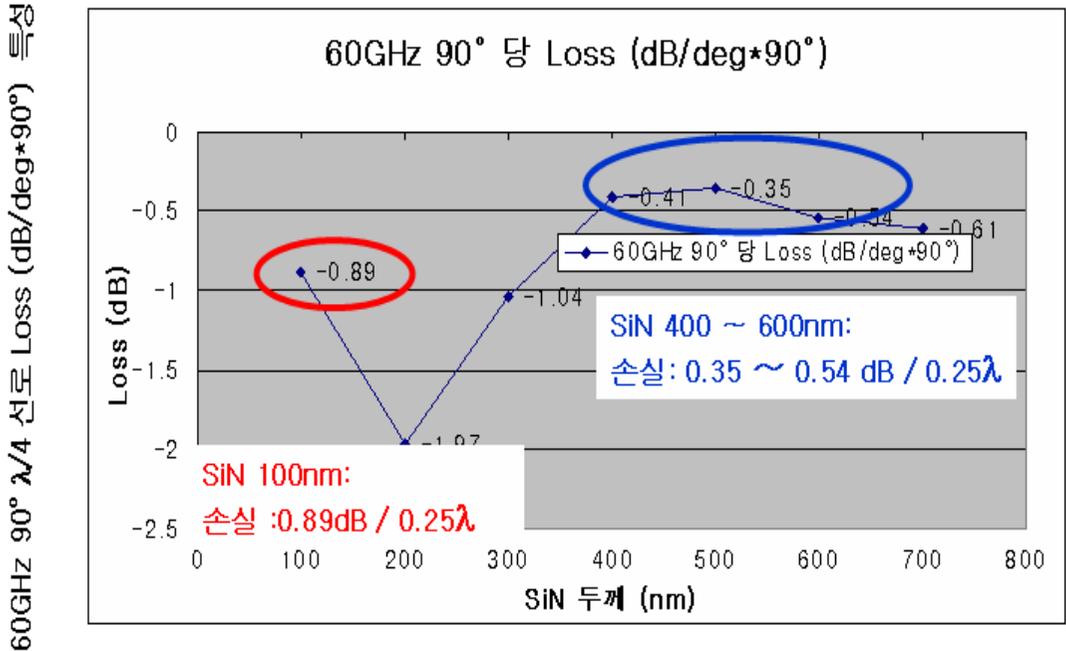


그림 3.9 60 GHz 90° λ/4 길이의 PPGM 선로에 대한 선로손실 특성
 Fig. 3.9 The dependency of insertion loss on SiN thickness (60 GHz, λ/4)

표 3-2 60 GHz 대역에서의 종래의 마이크로스트립 선로와 PPGM 선로의 선로파장 비교

종래의 마이크로스트립 선로	PPGM 선로	
1.74 mm	SiN 400 nm	0.59 mm
	SiN 500 nm	0.66 mm
	SiN 600 nm	0.71 mm

상기 결과에 의하면, SiN 두께 100 nm 인 경우보다 SiN 두께 400 ~ 600 nm 범위에서의 선로손실이 더 적은 것을 알 수 있다. 그러나 이 선로손실 값은 0.5 mm 의 균일한 길이의 PPGM 선로에 대해 측정된 손실이므로 보다 정확한 손실을 계산하기 위해서는 파장까지 고려한 손실효과를 계산해야 한다. 즉, SiN 두께가 두꺼워지면 손실은 감소하나, 파장이 길어지므로 결국 길어지는 파장만큼 늘어나는 손실을 고려해야 한다. 그러므로 각 두께에 대해 $\lambda/4$ 길이에 대한 손실을 고려하였다. 그림 3.9 는 $\lambda/4$ 길이의 PPGM 선로에 대한 선로손실 특성을 보여준다. 그림과 같이 SiN 두께 100 nm 인 경우 60 GHz 대역에서 손실은 $-0.89 \text{ dB}/0.25 \lambda$ 정도이나, SiN 두께가 400 ~ 600 nm 범위에서 손실은 $0.35 \sim 0.54 \text{ dB}/0.25 \lambda$ 이다. 따라서 파장의 효과까지 고려한 손실에 대해서도 SiN 두께가 400 ~ 600 nm 의 경우가 100 nm 인 경우 보다 손실이 약 절반가량으로 줄어든다. 그리고 SiN 두께를 400 ~ 600 nm 범위로 증가시켜도 종래의 마이크로스트립 선로에 비해 파장이 감소하는지를 보기위해 선로의 파장비교를 수행하였다. 표 3-2 는 60 GHz 대역에서의 종래의 마이크로스트립 선로와 PPGM 선로의 선로파장 비교를 나타낸다. 표 3-2 에서 보는 것과 같이 SiN 두께가 400 nm ~ 600 nm 인 PPGM 선로의 경우, PPGM 이 없는 종래의 마이크로스트립 선로 보다 파장이 33.9 ~ 40.8 % 로 대폭 줄어든다.

상기 결과들로부터 SiN 두께 400 ~ 600 nm 인 PPGM 선로의 경우가 가장 적은 손실을 보이며, PPGM 이 없는 종래의 마이크로스트립 선로 보다 파장이 33.9 ~ 40.8 % 로 대폭 줄어든다. 따라서 결과적으로 SiN 두께 400 ~ 600 nm 인 PPGM 선로의 경우가 가장 이상적이다. 그리고 SiN 두께 400 ~ 600 nm 의 효용성을 고찰하기 위해서 개방선로를 제작하여 RF 특성을 고찰하였다. 그림 3.10 은 SiN 두께 100 nm 선로길이 0.47 mm, 용량성분 $T= 5 \mu\text{m}$ 인 open stub 의 레이아웃과 온 웨이퍼 사진이다.

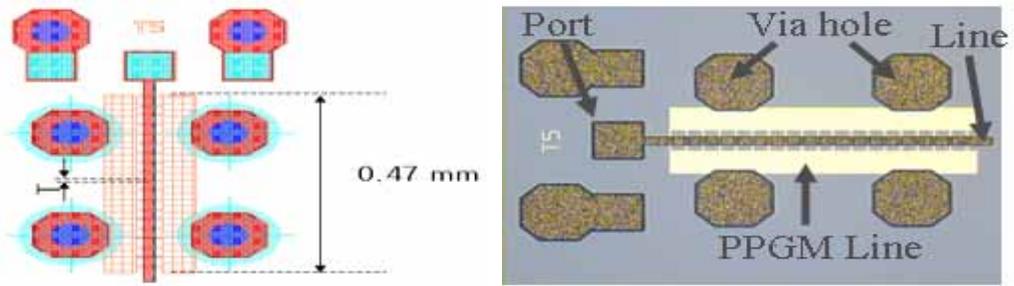
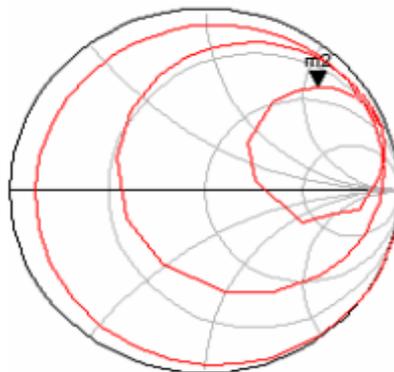
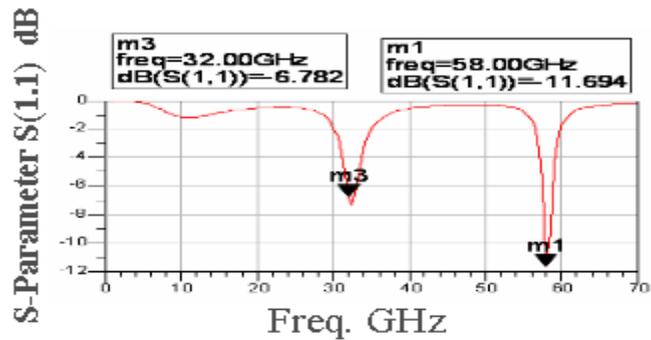


그림 3.10 PPGM 구조를 이용한 개방선로

Fig. 3.10 A photograph of the open stub employing PPGM



S-Parameter S(1,1)
Freq. (1 – 70 GHz)

그림 3.11 SiN 두께 100 nm 인 PPGM 개방선로의 RF 특성 그래프

Fig.3.11 Performance of the open stub employing PPGM (SiN 100 nm)

그림 3.11 은 SiN 두께 100 nm 인 개방선로의 RF 특성 그래프이다. 그림과 같이 SiN 두께 100 nm 경우, 개방선로의 공진특성 때문에 60 GHz에서 정합소자로서의 사용이 불가능함을 알 수 있다. 즉, SiN 두께 100 nm 경우 공진특성 때문에 이상적인 개방선로의 특성과는 매우 다른 특성을 보인다. 따라서 SiN 두께를 두껍게 함으로써 손실을 줄일 수 있고 이를 통해 공진주파수를 60 GHz보다 높은 곳으로 이동시킴으로써 60 GHz에서의 정합소자로서의 사용을 가능하게 하였다. 그림 3.12 는 SiN 두께 400 ~ 600 nm 인 PPGM 개방선로의 RF 특성을 나타낸다. 그림에서와 같이 SiN 두께 400 ~ 600 nm 인 경우 공진 특성이 없으며 이상적인 개방선로의 특성을 보인다. 단, SiN 100 nm의 경우는 0.47 mm 길이의 open stub 로 계산하였으나, 400 ~ 600 nm의 경우는 0.2 mm 의 open stub로 계산하였다. 결과적으로 SiN 두께 400 ~ 600 nm 인 PPGM 개방선로의 경우, 이상적인 개방선로와 유사한 특성을 보이며, 따라서 정합용 개방소자으로써 적합하다.

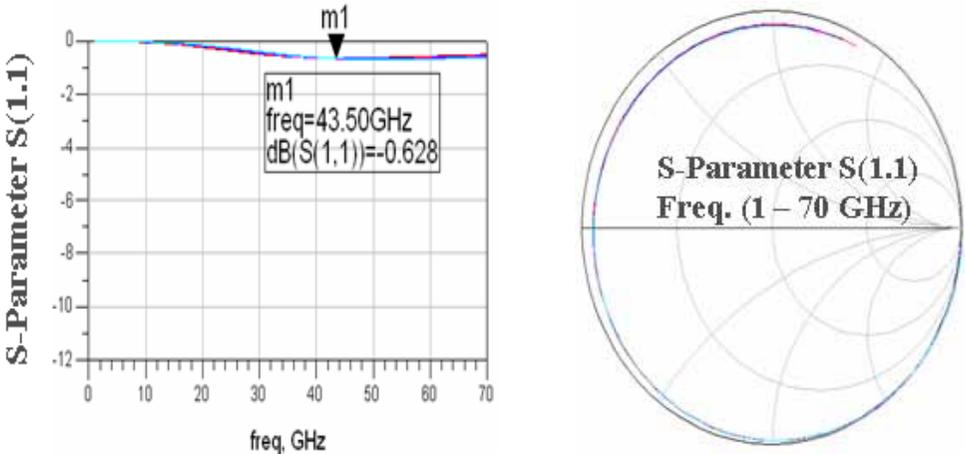


그림 3.12 SiN 두께 400 ~ 600 nm 인 PPGM 개방선로의 RF 특성 그래프
 Fig. 3.12 Performance of the open stub employing PPGM
 (SiN 400 ~ 600 nm)

3-1-5 PPGM 선로의 Ground Condition 의존성

그림 3.13 은 GND 개수에 따른 PPGM 선로 구조의 은 웨이퍼 사진이다. 또한 그림 3.14 는 PPGM 선로 구조의 선로손실의 GND 개수에 대한 의존성을 보여주는 그래프이다. 그림에서와 같이 PPGM 선로의 선로손실은 GND 상태에 상당히 민감하며, 비어 홀 개수가 많을수록 손실이 줄어든다. 예를 들면, 0.5 μm 선로에 대해 비어 홀 개수가 4개 일 때는 손실이 -3.2 dB (40 GHz), 비어 홀 개수가 1개 일 때는 손실 -7.6 dB (40 GHz)이다. 따라서 PPGM 선로의 손실을 줄이기 위해서는 가능한 많은 수의 비어 홀을 이용하여 GND를 강화해야 한다. 그러나 비어 홀 개수의 증가는 실질적인 MMIC 제작에 있어서는 크기상의 문제로 제약이 있어 한계가 있다.

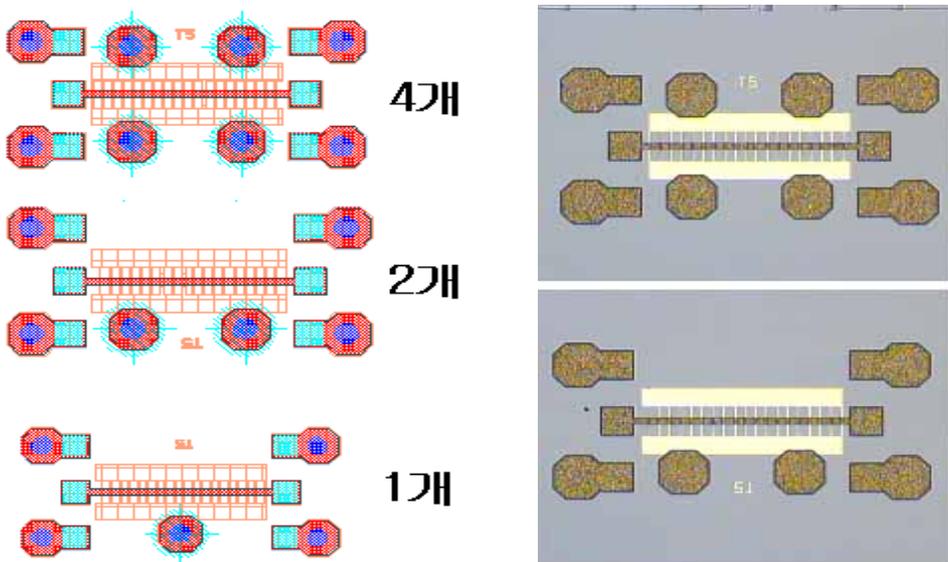


그림 3.13 비어 홀 개수를 달리하여 설계된 PPGM 선로

Fig. 3.13 A photograph of the dependency of PPGM on ground condition

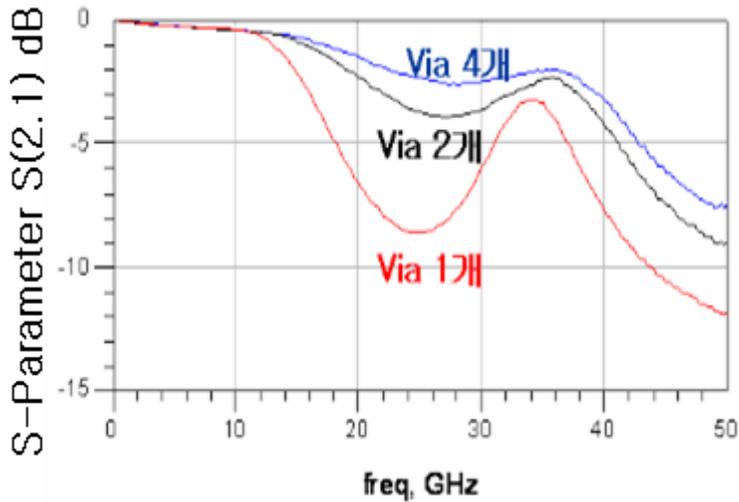


그림 3.14 PPGM 선로의 선로손실에 대한 GND 개수 의존성
 Fig. 3.14 The dependency of insertion loss on ground condition

3-1-6 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로에 대한 RF 특성

(1) 파장 감축효과

PPGM을 사용하는 경우, 파장은 종래의 마이크로 스트립 선로의 21.3 % 로 줄어든다. 예를 들면, 60 GHz 에서 파장(λ)은 0.37 mm (60 GHz, $T=5 \mu\text{m}$)이고, 종래의 마이크로스트립 선로는 파장(λ)이 1.74 mm (60 GHz, 선로 폭(W) $20 \mu\text{m}$)이다.

(2) 선로손실

선로의 길이 0.5 mm 용량성분(T)이 $5 \mu\text{m}$ 의 PPGM 선로에 대한 손실은 60 GHz에서 약 -6 dB 이지만 20 GHz 이하에서는 약 -1 dB 이고, SiN 두께를 증가시키면 파장 감축효과는 적어지나 손실은 줄어들므로 SiN 의 두께를 400 ~ 600 nm 로 설계 제작한다면 PPGM 선로를 MMIC 상의 정합소자로써 사용이 가능하며, on-chip 화에 용이하다.

(3) PPGM 선로손실과 비어 홀 개수 사이의 관계

PPGM 선로손실은 GND 상태에 상당히 민감하며, 비어 홀 개수가 많을수록 손실이 줄어든다. 예를 들면, 0.5 mm 선로에 대해 비어 홀 개수가 4 개 일 때는 손실이 -3.2 dB (40 GHz)이고, 비어 홀 개수가 1 개 일 때는 손실이 -7.6 dB (40 GHz)이다. 따라서 PPGM 선로의 손실을 줄이기 위해서는 가능한 많은 수의 비어 홀을 이용하여 GND 를 강화해야 한다. 그러나 MMIC 상의 on-chip 화를 고려할 때 크기 상의 한계가 있으므로 이를 고려하여 설계하여야 한다.

3.2 PPGM 코프레이너 선로의 RF 특성 평가

PPGM 선로의 선로손실은 GND 개수에 크게 영향을 받으며 비어 홀의 개수가 선로의 특성에 크게 영향을 미친다. 따라서 비어 홀을 사용하지 않는 코프레이너 형태의 선로를 설계 제작하여 RF 특성을 고찰하였다. 그림 3.15 는 길이 0.5 mm, 용량성분(T) 5 μm 인 코프레이너 형태의 PPGM 선로의 온 웨이퍼 사진이다.

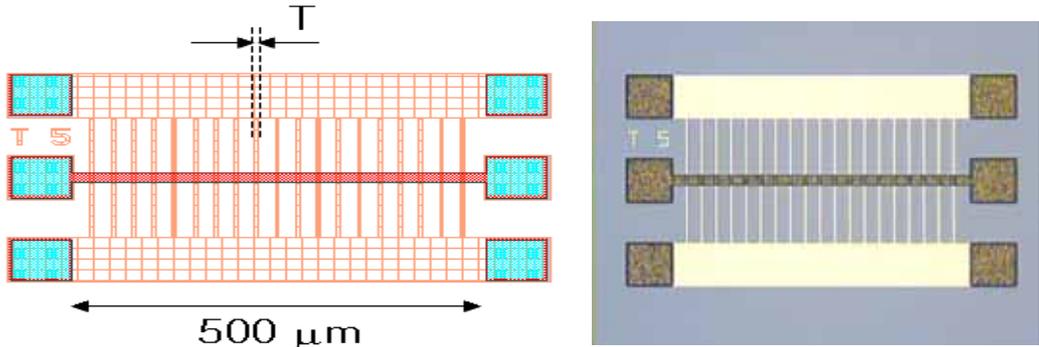


그림 3.15 코프레이너 형태의 PPGM 선로 (L= 0.5 mm, T= 5 μm)

Fig. 3.15 A photograph of the coplanar employing PPGM

3-2-1 코프레이너 형태의 PPGM 선로의 파장 감축효과

본 절에서는 코프레이너 형태의 PPGM 구조를 사용하는 경우와 종래의 마이크로 스트립 선로의 파장을 비교하여 PPGM 선로의 파장 축소 효과를 고찰한다. 그림 3.16 은 종래의 마이크로스트립 선로 (선로 폭 W 는 20 μm)와 그림 3.15 에 보여 지는 코프레이너 형태의 PPGM 구조를 이용한 선로의 용량성분 T 값을 (5 μm , 10 μm , 20 μm , 주기적 홀이 없는 Thin Film) 변화하여 각각의 파장을 비교한 그래프이다. 그림에서와 같이 코프레이너 형태의 PPGM 구조를 사용하는 경우, 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 16.6 % 로 줄어

드는 것을 확인 할 수 있다. 예를 들면, 주파수 60 GHz에서 코플레이너 형태의 PPGM 구조인 경우 파장 λ 는 0.289 mm (용량성분 T 는 5 μm)이고, 종래의 마이크로스트립 선로의 경우 파장 λ 는 1.74 mm (선로 폭 W 는 20 μm) 이다.

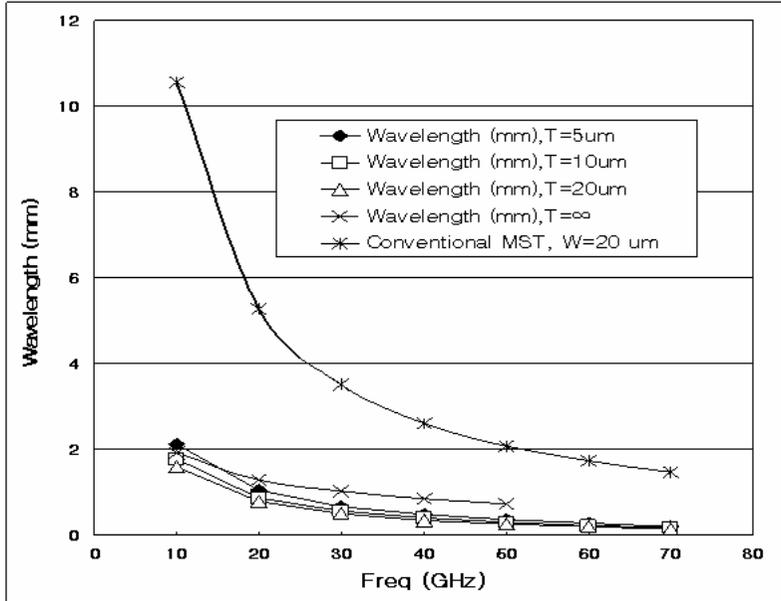


그림 3.16 코플레이너 형태의 PPGM 선로와 종래의 마이크로스트립 선로의 파장 비교

Fig. 3.16 The wavelength of conventional microstrip line and coplanar employing PPGM

3-2-2 코플레이너 형태의 PPGM 선로의 선로손실

그림 3.17 (a) 는 코플레이너 형태의 PPGM 구조를 이용한 용량성분 T= 5 μm , 길이 0.5 mm 선로이고. 그림 3.18 (b) 는 비어 홀 4 개를 사용한 PPGM 구조의 용량성분 T= 5 μm , 길이 0.5 mm인 마이크로스트립 선로의 사진이다.

그림 3.18 는 코플레이너 형태의 PPGM 선로와 비어 홀 4 개를 사용한 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로의 선로손실을 비교한 그래프이다.

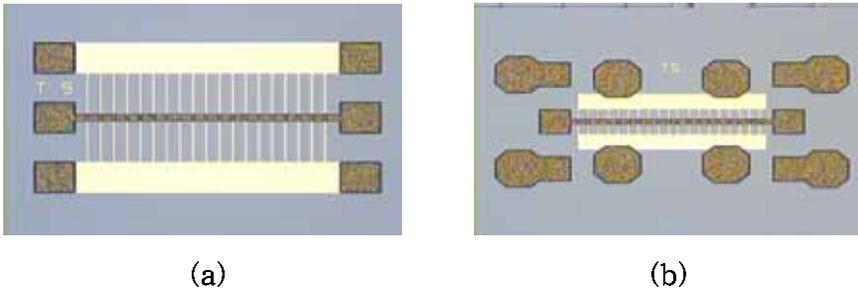


그림 3.17 (a) 코프레이너 형태의 PPGM 선로

(b) 비어 홀 4개를 사용한 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로

Fig. 3.17 A photograph of the (a) coplanar waveguide employing PPGM, (b) microstrip line structure employing PPGM

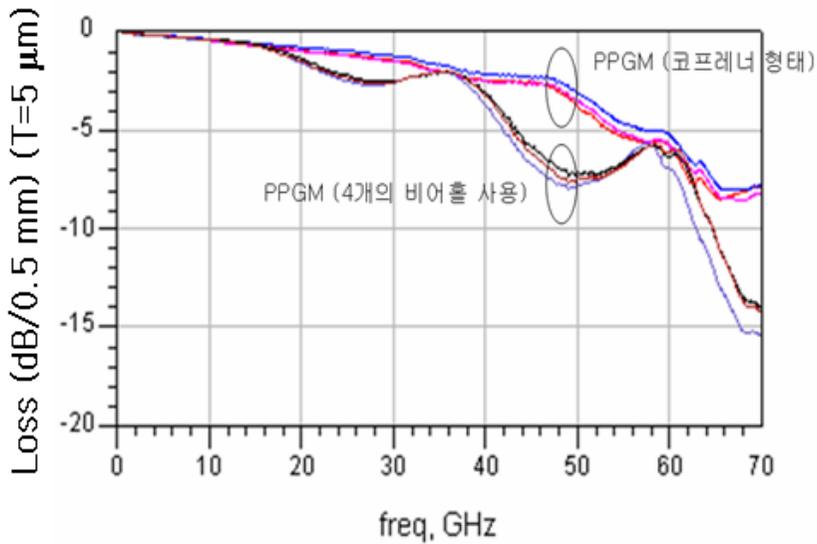


그림 3.18 코프레이너 형태의 PPGM 선로와 비어 홀 4개를 사용한 PPGM 구조의 마이크로스트립 선로의 선로손실

Fig. 3.18 The insertion loss of the coplanar waveguide and microstrip line structure employing PPGM

코프레너 형태의 PPGM 선로가 비어 홀 4 개를 사용한 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로보다 적은 선로손실 특성을 보인다. 표 3-3 은 용량성분 T= 5 μm 인 코프레너 형태의 PPGM 선로와 비어 홀 4 개를 사용한 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로에 대한 주파수대별 선로손실을 보여준다. 표 3-3 에서 보는 바와 같이 PPGM 코프레너 형태인 경우 60 GHz 에서 손실이 -5.2 dB 이고 비어 홀 4 개를 사용한 PPGM 마이크로스트립 형태인 경우 60 GHz 에서 손실이 -6.1 dB 를 보여준다.

표 3-3 코프레너 형태의 PPGM 선로와 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로의 주파수대별 선로손실(dB/0.5 mm) 비교

Freq (GHz)	PPGM (코프레너) dB	PPGM(마이크로스트립) dB
10	-0.382	-0.397
20	-0.81	-1.353
30	-1.235	-2.494
40	-2.137	-3.078
50	-3.048	-7.324
60	-5.211	-6.084
70	-7.744	-14.23

3.3 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로

PPGM 구조에 대해, 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 경우, 더 이상 주기적인 구조가 아니며, 따라서 주기적인 구조를 가지는 용량성분 T 값이 유한한 PPGM 구조와는 다른 특성을 가지며, 이러한 특성들을 고찰함으로써 소형화를 위한 MMIC 제작에 응용하고자 한다. 그림 3.19 는 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로의 단면도이다.

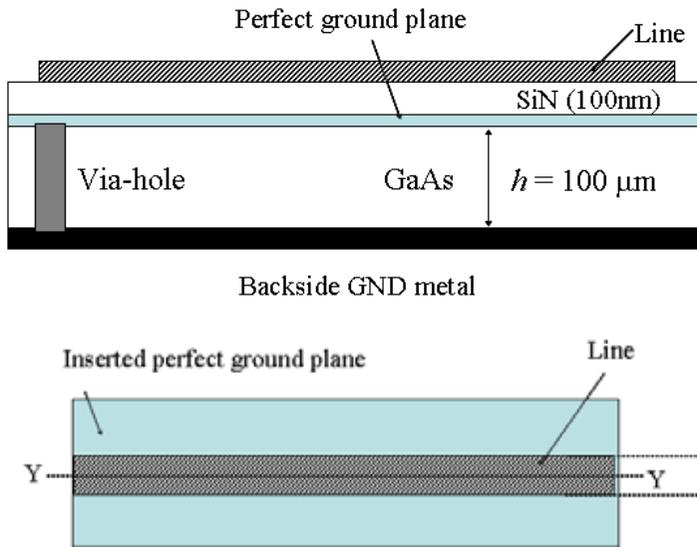


그림 3.19 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로의 단면도

Fig. 3.19 Thin film microstrip line structure employing PPGM

3-3-1 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로의 RF 특성

선로손실과 PPGM의 용량성분의 관계는 용량성분이 커질수록 손실이 커진다. 즉, 용량성분 T가 증가할수록 용량성분이 커지므로 손실이 증가한다. 구체적으로, T= 5 μm 인 경우 손실이 60 GHz에서 -5 dB 정도이나, 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 경우 -25 dB 정도이다.

이는 용량성분이 커질수록 유효 유전율이 증가하기 때문이다. 결국 Thin Film 형태구조의 전송선로는 큰 손실로 인해 60 GHz 에서 정합소자로 사용할 수 없다. 그림 3.20 은 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태 PPGM 선로의 용량 성분 T 변화에 대한 선로손실을 보여주고, 그림 3.21 은 종래의 마이크로스트립 선로(선로 길이 0.5 mm, 선로 폭 W 20 μm)와 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 PPGM 선로의 파장을 비교한 것이다. 그림 3.21 에서와 같이 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 경우, 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 32.4 % 로 줄어든다. 예를 들면, 60 GHz 에서 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 PPGM 선로의 경우 파장 λ 는 0.564 mm 이고, 종래의 마이크로 스트립 선로의 파장 λ 는 1.74 mm 이다.

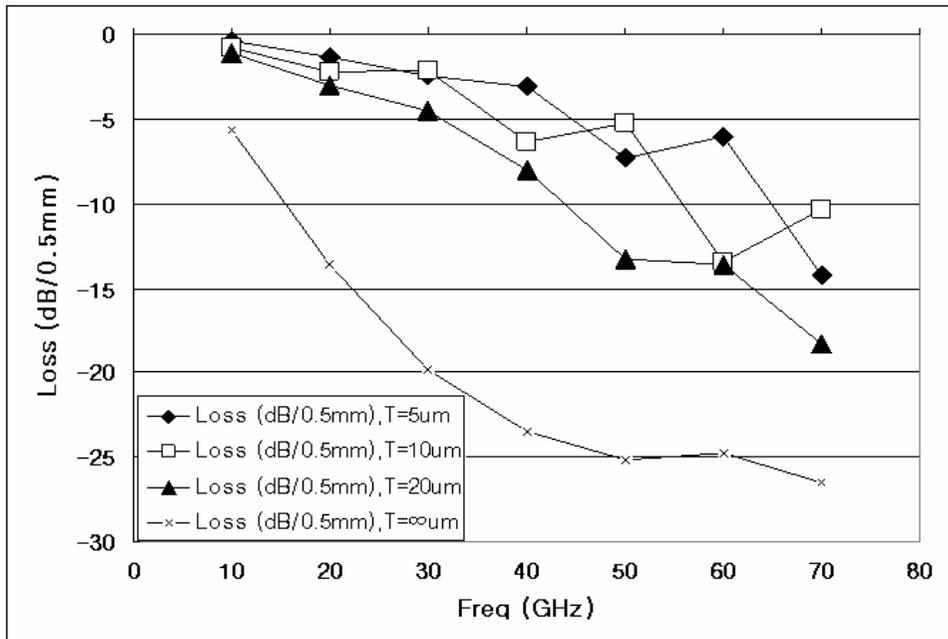
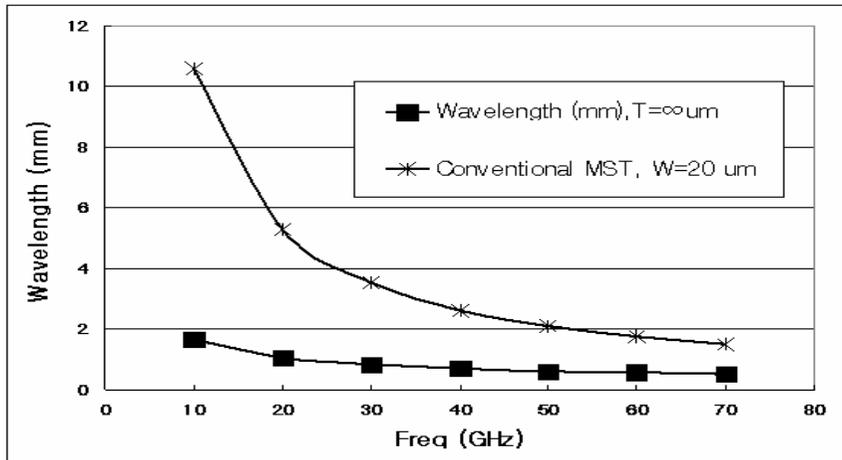


그림 3.20 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태 PPGM 선로의 용량성분 T 변화에 대한 주파수대역별 선로손실

Fig. 3.20 The insertion loss of the thin film and microstrip line structure employing PPGM



3.21 종래의 마이크로스트립 선로(선로 길이 0.5mm, 선로 폭 W 20 μ m)와 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 PPGM 선로 파장 비교

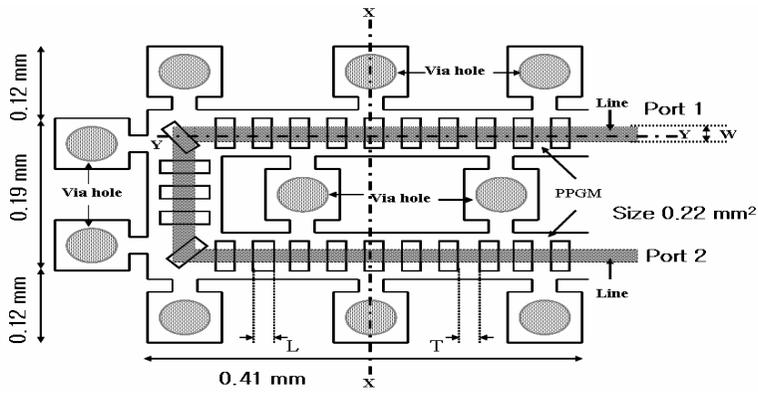
Fig. 3.21 The wavelength of the thin film and conventional microstrip line structure

3-3-2 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태의 PPGM 선로 평가

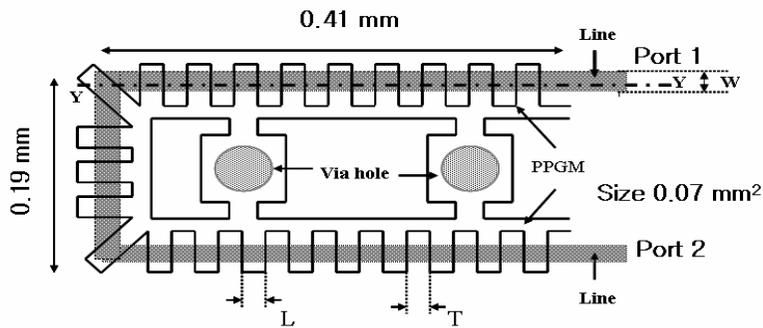
- (1) 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 PPGM 선로의 경우, 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 32.4 % 로 줄어든다. 예를 들면, 60 GHz 에서 PPGM 의 경우 파장 λ 는 0.564 mm 이고, 종래의 마이크로스트립 선로는 파장 λ 는 1.74 mm 이다.
- (2) 선로손실과 PPGM의 용량성분의 관계는 용량성분이 커질수록 손실이 커진다. 즉, 용량성분 T가 증가할수록 용량성분이 커지므로 손실이 증가한다. 구체적으로, 용량성분 T가 5 μ m 인 경우 손실이 60 GHz 에서 -5 dB 정도 이나, 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 PPGM 선로인 경우 -25 dB 정도 이다. 이는 용량성분이 커질수록 유효 유전율이 증가하기 때문이다. 결국 주기적 홀이 없는 Thin Film 형태인 PPGM 선로는 큰 손실로 인해 60 GHz 에서 정합소자로 사용할 수 없으나, 10 GHz 이하에서는 선택적으로 사용이 가능하다.

제 4 장 MMIC용 초소형/저임피던스 single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 제작 및 평가

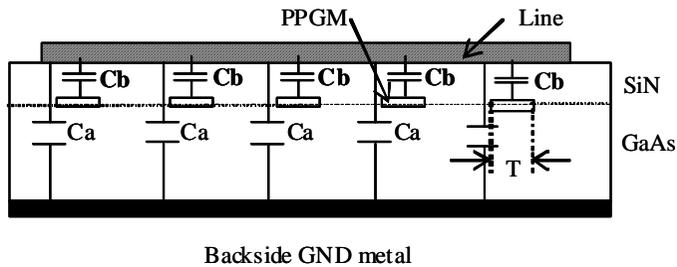
본 논문에서는 상기 단과장 선로의 RF 특성 평가 결과로 부터 높은 정전용량을 가지는 주기적 접지금속막 선로구조를 이용하여 MMIC 용 single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 를 제작하였다. 특히 PPGM single-sided via hole 구조는 Wilkinson power divider 의 크기를 초소형화하기 위해 응용하였다. 그림 4.1 (a) 와 (b)는 Wilkinson power divider 를 double-sided via hole 구조와 single-sided via hole 구조로 제작한 각각의 구조를 위에서 본 그림을 보여준다. 그리고 그림 4.1 (c) 는 그림 4.1 (a) 와 (b) 의 Y-Y의 단면 구조를 나타낸다. 그림 4.1 (a) ~ (c) 에서 보는 바와 같이 선로와 GaAs 기판의 접지금속막 사이에 추가로 주기적 홀을 가지는 접지금속막을 삽입하였으며, 주기적 접지금속막은 via hole 을 통해서 GaAs 기판의 접지금속막에 연결되어 접지전위를 공급한다. 접지금속막과 라인 사이에는 SiN 박막을 삽입하였다. 그림 4.1 (c) 에서 알 수 있는 바와 같이 접지금속막 선로구조의 용량에 있어서, 종래의 마이크로스트립 라인 구조에서 존재하는 용량 C_a 뿐 아니라 접지금속막과 선로 사이의 용량 C_b 가 추가적으로 존재한다. 선로와 접지금속막 사이의 용량이 증가할수록 특성임피던스 Z_0 와 선로파장 λ_g 는 감소한다. 즉 다시 말해 $Z_0=(L/C)^{0.5}$ 그리고 $\lambda_g=1/[f(LC)^{0.5}]$ 이기 때문이다. 표 4.1 은 PPGM 구조와 기존의 마이크로 스트립라인의 계산된 파장의 길이를 보여준다. 표 4.1 에서 PPGM 구조의 선로는 특성 임피던스 13 Ω , 선로 폭 20 μm , 그리고 파장은 2.35 mm 이고, 반면에 기존의 마이크로 스트립 선로의 특성 임피던스 13 Ω , 선로 폭 640 μm , 파장은 18.5 mm 이다. 결과적으로 이런 구조로부터 MMIC 상에서 수동소자들을 초소형화 저임피던스화를 실현할 수 있다. 또한 PPGM 구조에서 이상적인 그라운드를 위해서는 많은 수의 via hole 을 필요로 한다. 그러나 이런 많은 수의 via hole 들은 수동소자의 MMIC 구성에 있어 크기 면에서 큰 문제를 가지게 된다. 따라서 본 논문에서는 그림 4.1 (b) 의 single-sided via hole 구조를 응용하여 Wilkinson power divider 의 크기를 초소형화 함으로써 MMIC에 응용하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 4.1 (a) double-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider, (b) single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider, (c) Y-Y의 단면구조
 Fig. 4.1 (a) Double-sided via hole Wilkinson power divider, (b) single-sided via hole Wilkinson power divider, (c) A cross-sectional view according to Y-Y direction

표 4.1 PPGM 구조와 기존의 마이크로스트립 선로의 계산된 파장의 길이

	선로 폭 W	파장 λ
Conventional microstrip line	640 μm	18.5 mm
PPGM structure	20 μm	2.35 mm

그림 4.2는 PPGM 구조를 가지는 그림 4.1 (a) ~ (b) 의 double-sided via hole과 single-sided via hole 구조의 insertion loss 보여준다. 그림에서와 같이 두 구조는 25 GHz 까지 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 본 논문에서는 single-sided via hole 구조의 PPGM 선로를 이용하여 K band 주파수 대역 보다 낮은 주파수 대역에서의 MMIC 응용을 위한 Wilkinson power divider 를 제작하였다.

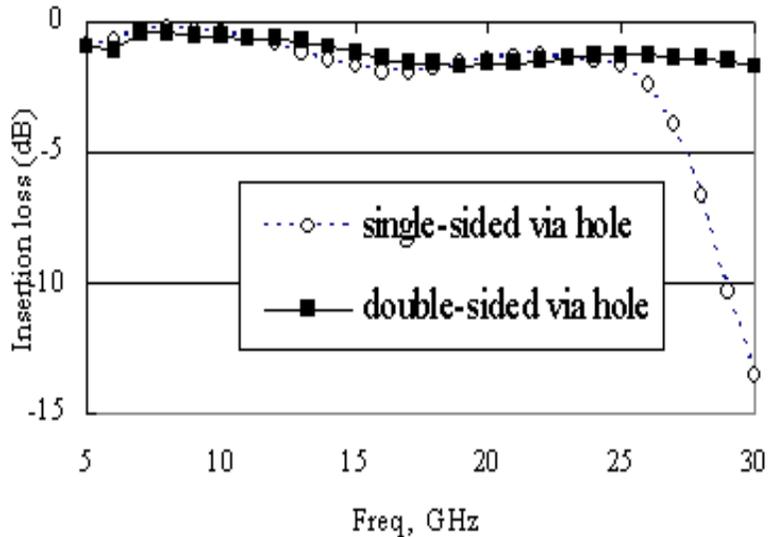


그림 4.2 Double-sided via hole과 Single-sided via hole 구조의 Insertion loss

Fig. 4.2 The insertion loss of the double-sided via hole structure and single-sided via hole structure

은 웨이퍼 상에 제작된 single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 의 사진은 그림 4.3 과 같다. 제작된 single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 의 실제 크기는 그림 4.3 에 보이는 점선 영역이며 이 초소형 저임피던스 on-chip Wilkinson power divider 는 동작주파수 5 GHz, 특성 임피던스 13 Ω 이며, MMIC 상의 제작된 크기는 0.11 mm² 로 기존의 마이크로스트립 선로(1.82 mm²) 로 제작되었을 때의 6 % 크기이다. 그림 4.3 에서 보는 바와 같이 RF 특성 측정을 위해 두 가지 형태의 on-chip Wilkinson power divider 를 제작하였다. 즉 은 웨이퍼 상에서의 RF 특성 측정은 2-Port 측정만 가능하므로 이를 위해서 먼저 power division 을 측정하기 위해 그림 4.3 의 오른쪽 그림과 같이 Port 1 과 Port 2 에는 패드를 달고 Port 3 은 포트 임피던스로 터미네이션 하였다. 그리고 isolation characteristics 를 측정하기 위해 그림 4.3의 왼쪽과 같이 Port 2 과 Port 3 에는 패드를 달고 Port 1 은 포트 임피던스로 터미네이션한 형태로 설계 제작하였다. 이로부터 측정된 측정데이터 값을 ADS Tool 에서 선로의 특성 임피던스를 입력하여 측정하였다.

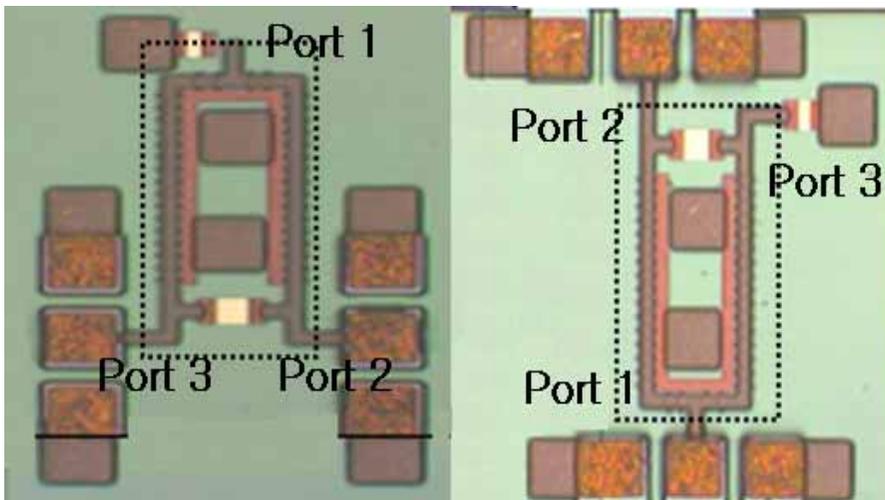
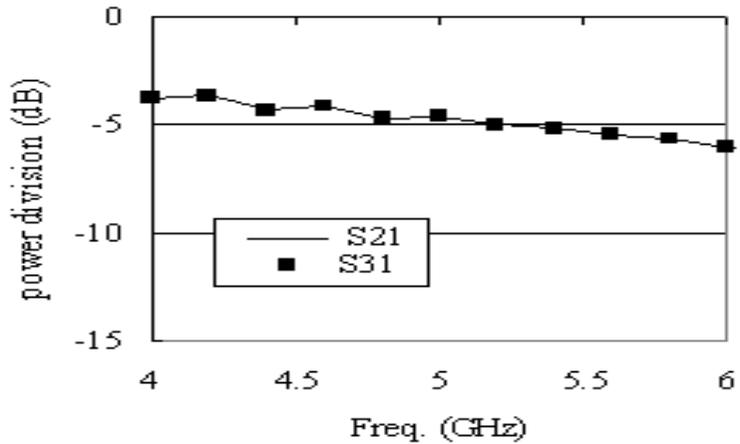
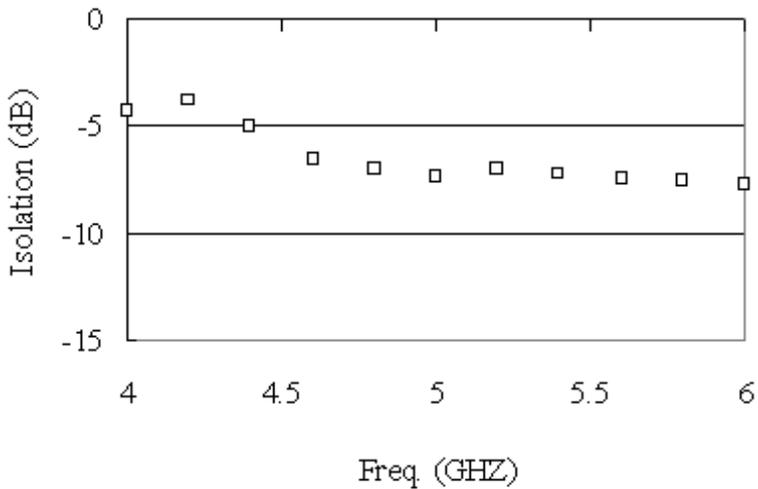


그림 4.3 은 웨이퍼 상에 제작된 on-chip Wilkinson power divider
 Fig. 4.3 A photograph of the on-chip Wilkinson power divider

그림 4.4 (a) 와 (b) 는 제작된 on-chip Wilkinson power divider 의 RF 특성을 보여준다. 그림 4.4 에서와 같이 Power division (S_{12} and S_{13}) 과 Isolation characteristics 은 각각 동작주파수 4.5 ~ 6.0 GHz 에서 각각 5.5 dB, 7.5 dB 임을 보여준다.



(a)



(b)

그림 4.4 Wilkinson power divider 의 (a) Power division, (b) Isolation characteristics

Fig. 4.4 The performance (a) Power division (S_{12} and S_{13}) and (b) Isolation characteristics of Wilkinson power divider

여기서 RF 특성을 좀 더 개선하는 방법으로 isolation 특성은 via hole 수를 늘림으로써 개선될 수 있고 Power division 과 선로손실의 개선은 앞에서 고찰한 결과로부터 SiN 높이를 400 ~ 600 nm 로 설계하면 가능하지만 MMIC 공정상의 제한과 초소형화, on-chip 화를 위해 single-sided via hole 구조로 설계 제작하였다.

결과적으로, 본 논문에서는 주기적 홀을 가지는 접지금속막 선로구조를 이용하여 GaAs MMIC 상에 초소형 저임피던스 on-chip single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 를 제작하였다. 여기서 파장은 PPGM 선로를 사용하는 경우 종래의 마이크로스트립 선로의 21.3 % 로 줄었다. 또한 제작된 초소형 저임피던스 on-chip single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 는 동작주파수 5 GHz, 특성 임피던스 13 Ω , 크기 0.11 mm² 로 기존의 마이크로 스트립 라인(1.82 mm²)으로 제작되었을 때의 6 % 크기이며, power division (S_{12} and S_{13}) 과 isolation characteristics (S_{23}) 의 측정값은 4.5 ~ 6.0 GHz 에서 각각 5.5 dB, 7.5 dB 임을 보여준다.

제 5 장 결 론

본 논문은 임피던스의 주파수 의존성이 존재하지 않는, 그리고, 공진구조에 의한 삽입손실의 증가 등의 문제점이 존재하지 않는 MMIC 제작에 적합한 단파장 선로를 설계하여, 이에 대한 RF 특성 평가 및 이를 이용한 MMIC 용 초소형 저임피던스 On-chip 단면접지 구조의 Wilkinson power divider 를 설계 제작하여 RF 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로를 사용하는 경우, 파장은 종래의 마이크로 스트립 선로의 21.3 % 로 파장이 줄어드는 효과를 얻었다. 예를 들면, 60 GHz 대역에서 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로의 용량성분 T 가 $5 \mu\text{m}$, 선로의 길이 0.5 mm 인 경우 선로 파장 λ 는 0.37 mm 이고, 종래의 마이크로 스트립 선로의 선로 파장 λ 는 1.74 mm 이다.
- (2) 용량성분 T 가 $5 \mu\text{m}$, 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로의 선로손실은 60 GHz에서 약 -6 dB 이고 20 GHz 이하에서는 -1 dB 이하이다. 따라서 현재의 SiN 두께 100 nm 의 구조를 가지는 PPGM 선로는 20 GHz 이하에서는 정합소자로서 사용이 가능하나 60 GHz 대역에서의 정합소자로서 사용하기에는 큰 손실 때문에 무리가 있다. SiN 두께를 증가시키면 파장 감축효과는 적어지나 손실을 줄이기 위해서는 SiN 두께를 400 ~ 600 nm 로 하는 것이 정합소자로서 적합하다. 차후 SiN 두께에 대한 손실과 파장의 trade-off 관계로부터 최적의 SiN 높이를 결정 할 필요가 있다.
- (3) 코프레이너 형태의 PPGM 선로를 사용하는 경우, 파장은 종래의 마이크로 스트립 선로의 16.6 % 로 줄어든다. 예를 들면, 60 GHz 에서 파장 λ 는 0.289 mm 이고, 종래의 마이크로스트립 선로의 파장 λ 는 1.74 mm 이다. 그리고 선로 손실은 코프레이너 형태의 PPGM 선로의 경우 60 GHz 에서 약 -5.2 dB 이고, 비어를 사용하는 마이크로스트립 형태의 PPGM

선로의 경우 선로손실이 약 -6.1 dB 로 코프레이너 형태의 PPGM 선로가 비어를 사용하는 마이크로스트립 형태의 PPGM 선로보다 적은 선로손실 특성을 보인다. 하지만 선로손실 때문에 정합소자로서 사용은 선택적으로 이루어져야 한다.

(4) PPGM 선로를 사용하는 경우 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 21.3 % 로 줄일 수 있고, 이로부터 주기적 홀을 가지는 접지금속막 선로 구조를 이용하여 GaAs MMIC 상에 초소형 저임피던스 on-chip single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 를 제작하였다. 또한 제작된 on-chip single-sided via hole 구조의 Wilkinson power divider 의 크기는 0.11 mm^2 로 기존의 마이크로 스트립 선로(1.82 mm^2) 로 제작된 것에 비해 약 10 % 정도로 축소되었고, RF 특성은 동작 주파수 5 GHz, 특성 임피던스 13 Ω 이며, power division (S_{12} and S_{13}) 과 isolation characteristics (S_{23}) 의 측정값은 4.5 ~ 6.0 GHz에서 각각 5.5 dB, 7.5 dB 이다.

표 5.1 PPGM 구조의 Wilkinson power divider

	선로 폭 W	파장 λ	Wilkinson power divider 크기
Conventional microstrip line	640 μm	18.5 mm	1.82 mm^2
PPGM structure	20 μm	2.35 mm	0.11 mm^2
Power division		5.5 dB (4.5~6.0 GHz)	
Isolation characteristics		7.5 dB (4.5~6.0 GHz)	

상기 결과들로부터 수동소자의 초소형화, 고집적화, on-chip 화를 위해 임피던스의 주파수 의존성이 적고, 공진구조에 의한 삽입손실의 증가 등의 문제점이 적은 MMIC 제작에 적합한 파장이 축소된 형태의 단파장 선로를 설계 제작 및 RF 특성을 평가하여 이를 이용한 MMIC 용 초소형 저임피던스 on-chip 단면접지 구조의 Wilkinson power divider 를 개발하였다. 이는 차후 RF 단말기 시장에서의 SoC 화 및 MMIC 상에 수동소자와 하이브리드 등을 on-chip 화하는 방법으로 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] K. Matsunaga, I. Miura and N. Iwata, "A CW 4-W Ka-Band Power Amplifier Utilizing MMIC Multichip Technology", IEEE J. Solid State Circuits, vol.35, no.9, pp.1293-1297, 2000.
- [2] I. Bahl, P. Bhartla, Microwave Solid State Circuit Design, John Wiley & Sons, Inc. Chapter 10, 1988.
- [3] Y. Itoh, M. Nii, N. Takeuchi, Y. Tsukahara and H. Kurebayashi, "MMIC/Super-MIC/MIC-Combined C- to Ku-Band 2W Balanced Amplifier Multi-ChipModule", IEICE Trans. Electron. vol.E80-C, no.6, pp.757-762, 1997.
- [4] D. R. Webster, G. Ataei and D. G. Haigh, "Low-Distortion MMIC Power Amplifier Using a New Form of Derivative Superposition", IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol.49, no.2, pp.328-332, 2001.
- [5] Young Yun, Kyung-Sik Lee, Chung-Ryul Kim, Ki-Man Kim, and Ji-Won Jung, "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 Transactions On Microwave Theory and Technique, Vol.54, pp.3805-3817 October, 2006.
- [6] Young Yun, etal. "A Fully-integrated broadband amplifier MMIC employing a novel chip size package", IEEE Trans. MTT. Vol.50, pp.2930-2937, 2002.
- [7] T. Satoh, T. Shimura, S. Ichikawa, A. B. Berutto, C. Poledrelli, Y. Furukawa, Y. Hasegawa, S. Kuroda, and J. Fukaya, "A Compact PA MMIC Module for K-Band High-Speed Wireless Systems", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. pp.1333-1336. 2000.

- [8] Young Yun, "A Novel Microstrip Line Structure Employing a Periodically Perforated Ground Metal and Its Application to Highly Miniaturized and Low Impedance Passive Components Fabricated on GaAs MMIC", IEEE Transactions On Microwave Theory and Technique, Vol.53, No.6, pp. 1951-1959, June, 2005.
- [9] T. Hirota, and M. Masahiro, "K-band frequency up-converters using reduced-size couplers and dividers," 1991 GaAs IC Symposium Digest, pp.53-56, 1991.
- [10] 윤영 저, "RF 능동회로 설계이론 및 설계" 홍릉과학 출판사, Chapter [1-3], [2], [5], 2005.
- [11] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.

발 표 논 문

국제 학술지 게재논문

- [1] Chung-Ryul Kim and Young Yun, "A highly miniaturized and low impedance on-chip Wilkinson power divider employing PPGM on MMIC", Microwave and Optical Technology Letters, Vol.49, Issue.2, pp. 491-493, 18, Dec, 2006.
- [2] Young Yun, Kyung-Sik Lee, Chung-Ryul Kim, Ki-Man Kim, and Ji-Won Jung, "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 Transactions On Microwave Theory and Technique, Vol.54, pp.3805-3817, October, 2006.

국제 학술대회 발표논문

- [3] Chung-Ryul Kim and Young Yun, "Highly Miniaturized and Low impedance On Chip Wilkinson Power Divider Employing Periodically Perforated Ground Metal on MMIC," Proceeding of Progress In Electromagnetics Research Symposium, Tokyo, Japan pp.157-161, 2006.
- [4] Young Yun, Kyung-Sik Lee and Chung-Ryul Kim, "A highly miniaturized broadband on-chip impedance transformer employing PPGM on GaAs MMIC", Proceeding of Progress In Electromagnetics Research Symposium, Tokyo, Japan, pp.152-156, 2006.

- [5] Y. Yun, and Chung-Ryul Kim, "Highly Miniaturized On-Chip RF Components employing PPGM with single-sided via holes for application to GaAs MMIC," Proceeding of Asia Pacific Microwave Conference, Tokyo, Japan Vol.2 pp. 1329-1332, 2006.
- [6] Young Yun, Kyung-Sik Lee and Chung-Ryul Kim, "A highly miniaturized on-chip impedance transformer employing PPGM for application to GaAs MMIC," Proceeding of Mediterranean Microwave Symposium, Genova, Italy, pp.149-152, 2006.

국내 학술대회 발표논문

- [7] 김충열°, 조한나, 윤 영, "PPGM 선로의 RF 특성에 대한 접지구조의 특성 고찰 및 단면 접지형 초소형 수동소자의 MMIC상의 응용", 2006년도 전자파 학회 종합학술 발표회 논문집 Vol.16, No.1, pp.69-73. 11월 2006. (수원 경희대학교)
- [8] 이동환°, 박영배, 김충열, 이경식, 윤 영, 안광호, " π 형 다중결합선로를 이용한 소형 월킨슨 전력분배기 개발", 2006년도 전자파 학회 종합학술발표회 논문집 Vol.16, No.1, pp.25-28, 11월 2006. (수원 경희대학교)
- [9] 박영배°, 이동환, 김충열, 이경식, 김세호, 윤 영, "2.4 GHz RFIC/MMIC용 소형화된 능동형 90° 위상 결합기의 설계", 2006년도 전자파 학회 종합학술발표회 논문집 Vol.16, No.1, pp.45-49, 11월 2006. (수원 경희대학교)
- [10] 이경식°, 이동환, 박영배, 김충열, 윤 영, "LO 누설신호 제거를 위한 스파이럴 인덕터를 결합한 RFIC/MMIC용 수신용 게이트 믹서의 개발", 2006년도 전자파 학회 종합학술발표회 논문집 Vol.16, No.1, pp.271-274, 11월 2006. (수원 경희대학교)
- [11] 김충열, 윤영, "해양 IT 소자에의 응용을 위한 MMIC용 초소형 저임피던스 on-chip 월킨슨 전력분배기 설계", 2006년도 한국마린 엔지니어링 학회 후기학술 대회 논문집, pp.213-214. 11월 2006. (부산)

- [12] 김충열, 이경식, 윤영, 박영배, 이동환, “PPGM을 이용한 초소형 수동소자와 RFIC/MMIC에의 응용”, 2006년도 춘계 마이크로파 및 전파전파연구회 학술발표회 논문집, 第29券 第1號, pp.493-496, 5월 2006. (용인 한국항공대학교)
- [13] 이동환, 박영배, 김충열, 이경식, 윤영, “ π 형 다중결합선로를 이용한 소형 윌킨슨 전력분배기 개발”, 2006년도 춘계 마이크로파 및 전파전파연구회 학술발표회 논문집, 第29券 第1號, pp.497-500, 5월 2006. (용인 한국항공대학교)
- [14] 이경식, 이동환, 박영배, 김충열, 윤영, “T형 단일선로를 이용한 새로운 모형의 PBG cell로 구성된 소형 Band-Stop Filter의 개발”, 2006년도 춘계 마이크로파 및 전파전파연구회 학술발표회 논문집, 第29券 第1號, pp.501-504, 5월 2006. (용인 한국항공대학교)
- [15] 김충열, 윤영, 민경식, 이경식, 박영배, 이동환, “RFIC/MMIC 용 초소형 윌킨슨 전력분배기의 설계”, IT SoC Conference 2005, 第2券, pp.603-606, 11월 2005. (서울 COEX)
- [16] 이경식, 윤영, 김충열, 이동환, 박영배, “주기적 접지 금속막 선로구조를 가지는 저주파용 RFIC/MMIC용 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 설계”, IT SoC Conference 2005, 第2券, pp.599-602, 11월 2005. (서울 COEX)
- [17] 이동환, 박영배, 윤영, 이경식, 김충열, “저임피던스 소형 윌킨슨 전력분배기의 설계”, IT SoC Conference 2005, 第2券, pp.595-598, 11월 2005. (서울 COEX)
- [18] 이동환, 김충열, 박영배, 이경식, 윤영, “해상통신 시스템 응용을 위한 초소형 RF 수동소자의 개발”, 2005년도 한국마린 엔지니어링 학회 후기학술대회 논문집, pp.63-64, 11월 2005. (창원)
- [19] 김충열, 윤영, “RFIC/MMIC용 초소형 저임피던스 윌킨슨 전력분배기 설계” 2005년도 추계 마이크로파 및 전파전파연구회 학술발표회 논문집, 第28券 第2號, pp.161-164, 9월 2005. (관동대학교)

- [20] 김충열, 운영, “해양 IT 소자에의 응용을 위한 RFIC/MMIC용 초소형 저임피던스 윌킨슨 전력분배기 설계”, 2005년도 한국마린 엔지니어링 학회 전기 학술대회 논문집, pp.339, 6월 2005. (경주 교육문화회관)

가
MMIC
2
가
가
MMIC
가
2
가