

工學碩士 學位論文

MMIC상에서 주기적으로 배치된 용량성 소자를
이용한 단파장 전송선로의
기본 특성에 관한 연구

A Study on Basic Characteristics of Short Wavelength
Transmission Line Employing Periodically Arrayed
Capacitive Devices on MMIC

指導教授 1945 尹 榮

The seal of Korea Maritime University is a circular emblem. It features a central design with three vertical bars and a wavy line below them. The text 'KOREA MARITIME UNIVERSITY' is written around the top inner edge, and '한국해양대학교' is written around the bottom inner edge. The year '1945' is positioned in the center of the seal.

2012 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

電波工學科

鄭 章 鉉

本 論 文 을 鄭 章 鉉 의
工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 姜 仁 鎬



委 員 : 姜 錫 燁



委 員 : 尹 榮



2011 年 2 月

韓 國 海 洋 大 學 教 大 學 院

電 波 工 學 科

鄭 章 鉉

목 차

Nomenclature	
Abstract	1
제 1 장 연구 배경 및 목적	3
제 2 장 PACD 구조 선로의 기본 특성	5
2.1 PACD 선로의 기본 구조	5
2.2 PACD 선로의 과장 축소 효과 및 특성 임피던스	9
2.3 PACD 선로 구조의 손실, 전송상수, 유효유전율 특성	14
제 3 장 PACD 구조 선로의 등가회로를 이용한 이론적 해석	18
제 4 장 PACD 구조 선로의 초소형 수동소자 개발에의 응용	23
제 5 장 결 론	26
참고문헌	28

그림 목 차

그림 2.1.1 (a) Conventional microstrip line structure	5
그림 2.1.1 (b) Equivalent circuit of conventional MST	5
그림 2.1.2 (a) A structure of the microstrip line employing PACD	8
그림 2.1.2 (b) A cross-sectional view according to X-X direction of the microstrip line employing PACD	8
그림 2.1.2 (c) A cross-sectional view according to Y-Y direction of the microstrip line employing PACD	8
그림 2.2.1 Measured wavelength of the microstrip line employing PACD and conventional one	9
그림 2.2.2 Measured wavelength of the microstrip line employing PACD and PPGM	10
그림 2.2.3 The dependency of characteristic impedance on frequency of microstrip line employing PACD	13
그림 2.3.1 Measured insertion loss of microstrip line employing PACD ($l_c = 10 \mu\text{m}$)	14
그림 2.3.2 Measured effective propagation constant of microstrip line employing PACD and conventional one	16

그림 2.3.3 Measured effective dielectric constant of microstrip line employing PACD and conventional one	16
그림 3.1 (a) A structure of the microstrip line employing PACD	18
그림 3.1 (b) An equivalent circuit for unit cell of PACD structure	18
그림 3.2 An equivalent circuit of PACD structure	19
그림 3.3 (a) Insertion loss of PACD structure($l_c=10\mu\text{m}$)	22
그림 3.3 (b) ($l_c=20\mu\text{m}$).....	22
그림 4.1 A photograph of impedance transformer employing PACD structure	23
그림 4.2 Measured insertion and return loss of the impedance transformer employing PACD	25

표 목 차

Table 2.3.1 Insertion loss of microstrip line employing PACD and conventional one	15
Table 4.1 Size of the impedance transformer employing microstrip line with PACD and conventional one	25

Nomenclature

C_a	:	Capacitance between the line and GND
C_c	:	Additional Capacitance between PMS and ULM
Z_0	:	Characteristic impedance
λ_g	:	Guided-wavelength
l_c	:	Length of PMS
β	:	Effective propagation constant
ϵ_e	:	Effective dielectric constant
W	:	Width of the line
G	:	Width between the line and GND
l_h	:	Width of PMS
d_i	:	Thickness of SiN film
R_g	:	Resistance of PMS
L_g	:	Inductance of PMS
R_L	:	Resistance of the line
L_{ind}	:	Inductance of the line
L	:	Inductance
f	:	Frequency

Abstract

A Study on Basic Characteristics of Short Wavelength Transmission Line Employing Periodically Arrayed Capacitive Devices on MMIC

In this study, a short-wavelength transmission line employing periodically arrayed capacitive devices (PACD) was studied for application to miniaturized on-chip passive component on monolithic microwave integrated circuit (MMIC). According to the results, the microstrip line employing PACD showed shorter wavelength and lower characteristic impedance than conventional one. The wavelength microstrip line employing PACD structure was 8% of the conventional one on GaAs substrate. Using the theoretical analysis, basic characteristic of the transmission line employing PACD (e.g., loss, effective dielectric constant, effective propagation constant, bandwidth) were also investigated in order to evaluate its suitability for application to a development of miniaturized passive on-chip components on MMIC. In addition, for application to the design of RF passive components, the equivalent circuit of the PACD structure should be extracted. And for the theoretical analysis,

parasitic components of PACD's equivalent circuit were used closed-form equations. Above results indicate that the microstrip line employing PACD is a promising candidate for a development of miniaturized passive components on MMIC.



제 1 장 연구 배경 및 목적

21세기에 들어선 이후, 유비쿼터스 서비스가 가능한 정보통신기술의 발전은 IC(integrated circuit) 기술의 급격한 발전을 초래하였다. 이에 따른 단말기의 소형화, 고집적화가 RF 부품시장에서 요구되어지고 있으며, 그 중 RF 송수신단은 수동소자를 다량 집적한 고집적 단말기가 요구되어지고 있는 추세이다. 따라서 이를 위한 수동소자의 집적화 기술은 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히, 결합기 및 분배기, 필터 등의 대부분의 수동소자들은 큰 점유면적으로 인해 MMIC 내부에 집적되지 못하고 있으며, MMIC 외부의 프린트 기판 상에 설계, 제작되고 있는 실정이다 [1, 2]. 위의 문제점을 해결하기 위해서는 MMIC 내부에 집적 가능한 소형 수동소자 개발을 위해 단파장 선로의 개발이 필요하다.

이를 위해 본 연구 그룹에서는 PPGM (periodically perforated ground metal)구조를 제안하였으며, 상기 구조로부터 단파장 특성을 확인하였다 [3, 4]. 그러나, PPGM 구조의 경우 주기적 구조를 구성하는 단위 셀의 크기가 너무 커지면, 단위 길이당 존재하는 주기적인 셀의 수가 감소하여 오히려 파장이 증가하였다[3, 4]. 따라서, PPGM 선로구조의 파장은 종래의 마이크로스트립 선로파장의 20 %정도로 단파장특성을 보여주었으나, 그 이상의 파장축소 효과는 실현되지 못하였다.

본 연구에서는 상기의 문제점을 해결하기 위해서 GaAs 반도체 상에서 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 선로구조 (PACD:

periodically arrayed capacitive devices)를 제안한다. 본 연구에서 제안된 전송선로는 종래의 PPGM 선로구조에 비해 더욱 짧은 선로과장을 보여주었으며, 저임피던스의 특성을 나타내었다. 본 연구에서 제안한 PACD 선로구조는 이제까지 발표된 주기적 구조의 선로[5-11] 중에서 가장 짧은 과장특성을 보여준다. 또한, 본 연구에서는 GaAs 반도체 상의 PACD 선로구조에 대한 대역폭 및 특성 임피던스, 유효 유전율, 손실 특성 등의 광범위한 물리적 특성을 등가회로를 통하여 상기 선로 구조에 대하여 MMIC 상에서의 응용 가능성을 연구하였다.



제 2 장 PACD 구조 선로의 기본 특성

2.1 PACD 선로의 기본 구조

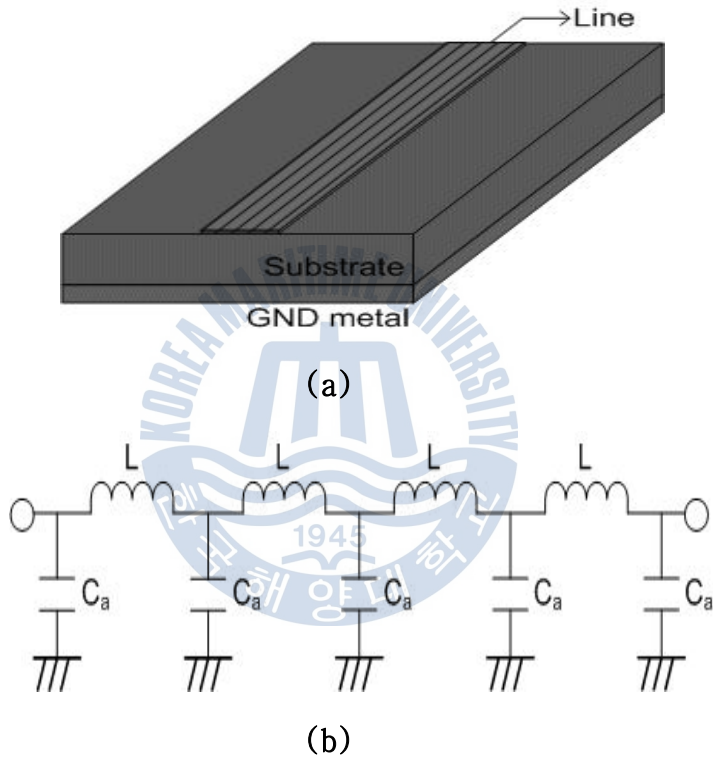


그림 2.1.1(a) Conventional microstrip line structure.
(b) Equivalent circuit of conventional MST.

그림 2.1.1(a)는 기존의 GaAs 반도체 상의 마이크로스트립 구조[6]를 보여준다. 선로와 접지 금속막 사이에 발생하는 전계에 의해 단위 길이당 정전용량 C_a 가 존재하며, 선로상에 흐르는 전류에 의해 인덕

턴스가 발생한다. 따라서, 마이크로파 전송선로는 그림 2.1.1(b)와 같이 주기적인 LC구조와 동가이다. 따라서, 그림 2.1.1에서 보여진 기존의 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스 Z_0 와 선로 파장 λ_g 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

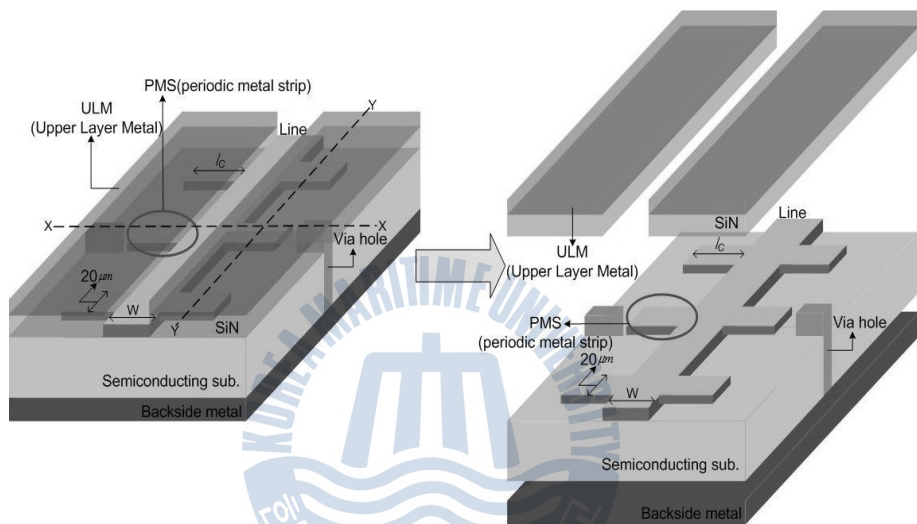
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1.1)$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}} = \frac{1}{f \sqrt{LC}} \quad (2.1.2)$$

상기 식에서 인덕턴스 L은 선로의 단위 길이당 인덕턴스 치에 해당하며, f는 동작주파수이다. 식 (2.1.1)과 식 (2.1.2)에서 알 수 있듯이 선로와 접지금속사이의 용량 C가 증가 할수록 특성임피던스 Z_0 와 선로 파장 λ_g 은 감소한다. 이 점에 주목하여 본 연구에서는 반도체 기판 상에 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 선로구조 (PACD: periodically arrayed capacitive devices)를 제안한다.

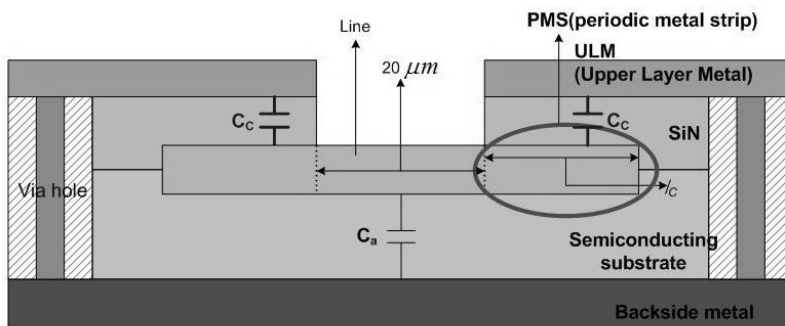
그림 2.1.2(a)는 본 연구에서 제안하는 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 선로(PACD: periodically arrayed capacitive devices)의 구조이고, (b)는 PACD 구조의 X-X 방향에 대한 단면 구조이고, (c)는 Y-Y방향에 대한 단면구조이다. 빗무늬 형태의 선로의 형태는 그림과 같이 직선의 선로의 양단에 주기적인 금속 스트립 (PMS: periodic metal strip)이 접속되어 있다. 선로가 주기적으로 용량성분을 가지게 하기 위해서 주기적인 금속 스트립 (PMS: periodic metal strip)상에 상부금속 ULM (upper layer metal)을 배치하고,

PMS와 ULM사이에는 SiN를 삽입하였다. 그리고, ULM은 비어홀을 통해 뒷면의 접지 금속막 (backside metal)에 연결됨으로써 ULM은 접지가 된다. 따라서, 그림 2.1.2(b), (c)와 같이 PACD 구조는 종래의 마이크로스트립 선로에 비해 PMS와 접지면인 ULM 사이에 존재하는 주기적인 용량 C_c 가 추가적으로 존재한다.

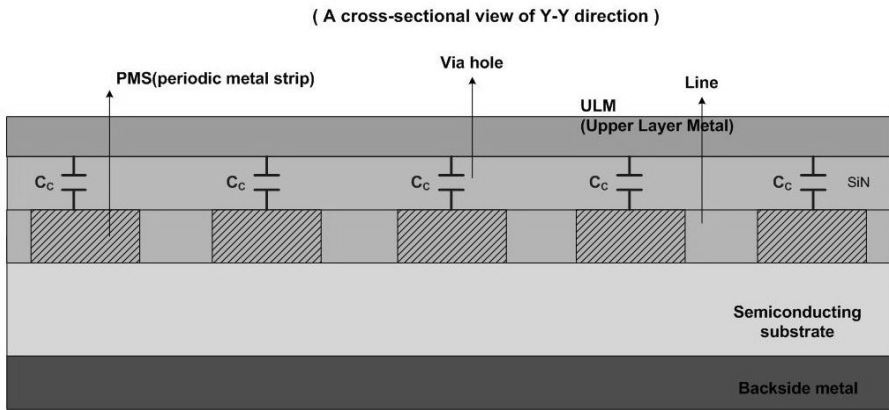


(a)

(A cross-sectional view of X-X direction)



(b)



(c)

그림 2.1.2(a) A structure of the microstrip line employing PACD.

(b) A Cross-sectional view according to X-X direction of the microstrip line employing PACD.

(c) A Cross-sectional view according to Y-Y direction of the microstrip line employing PACD.

추가적으로 발생한 용량 C_c 에 의해 그림 2.1.2의 PACD 구조는 종래의 전송선로보다 더 짧은 파장을 보여준다. 즉, 그림 2.1.1의 종래의 선로구조의 경우, 식 (2.1.1), (2.1.2)의 용량부는 $C=C_a$ 이지만, 그림 2.1.2의 PACD 구조에 대해서는 $C=C_a+2C_c$ 가 되므로, PACD 구조를 이용한 선로의 임피던스와 선로파장은 종래의 선로구조에 비해 줄어들게 된다. 식 (2.1.1), (2.1.2)에 PACD의 이론을 적용하면 다음과 같다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_a + 2C_c}} \quad (2.1.3)$$

$$\lambda_g = \frac{1}{f \sqrt{L(C_a + 2C_c)}} \quad (2.1.4)$$

그림 2.1.2(b)의 용량성 소자부분인 PMS의 길이 l_c 를 조절하면, 용량 C_c 는 쉽게 변화시킬 수 있으며, 그 결과, 특성임피던스 Z_0 와 선로 파장 λ_g 의 크기를 조절할 수 있다. 그리고 l_c 의 길이를 증가시켜도 단위 길이당 셀의 수는 고정되어 주기적인 구조를 유지하므로 선로 파장의 축소 효과가 있게 된다.

2.2 PACD 선로의 파장 축소 효과 및 특성 임피던스

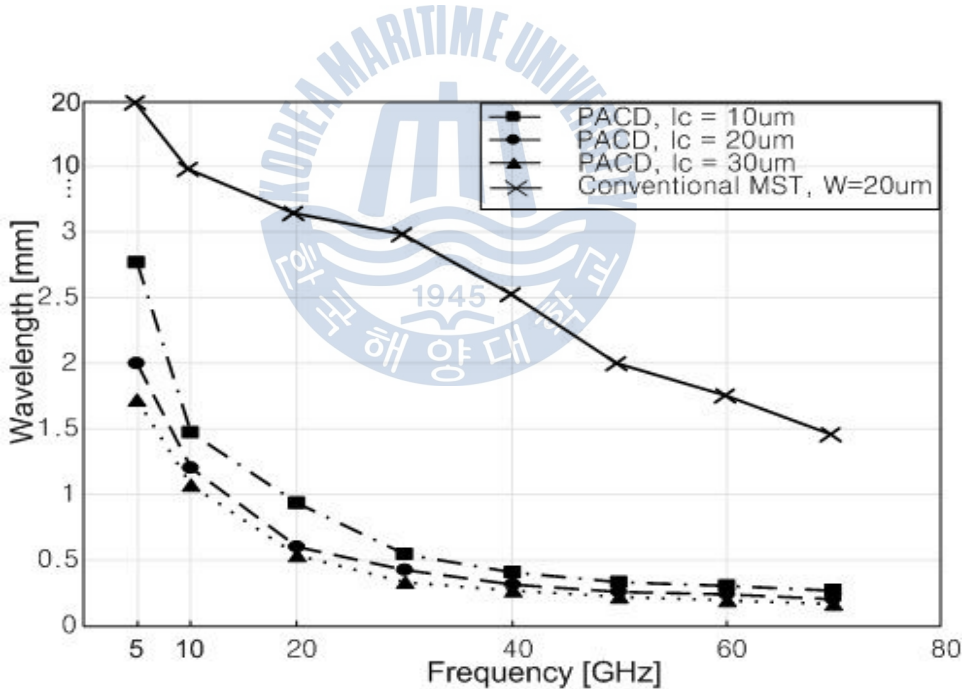


그림 2.2.1. Measured wavelength of the microstrip line employing PACD and conventional one.

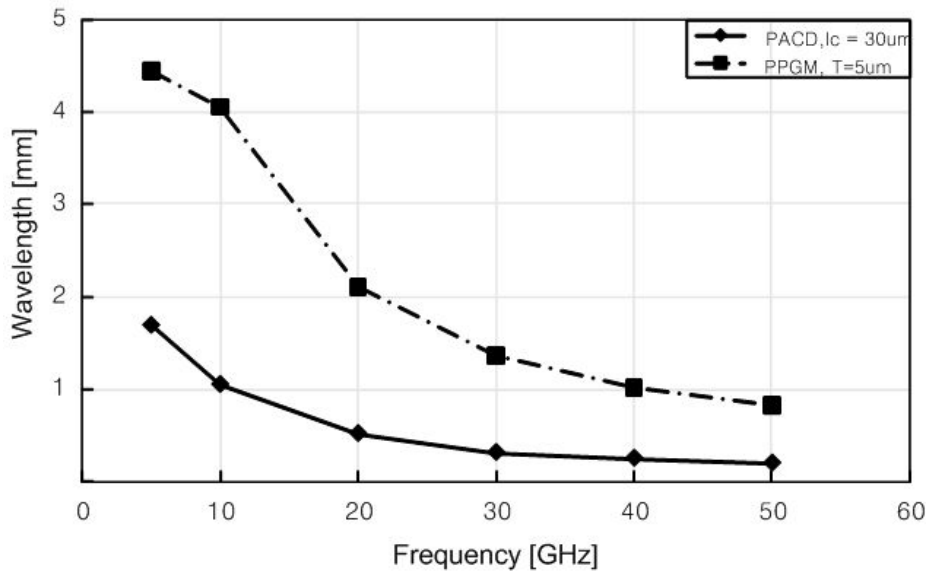


그림 2.2.2 Measured wavelength of the microstrip line employing PACD and PPGM.

그림 2.2.1은 기존의 마이크로스트립 선로의 파장과 PACD 구조의 파장을 측정된 값의 결과를 비교한 그래프이다. 그림 2.2.1에서 알 수 있듯이 PACD 구조의 선로파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 8 %로 축소됨을 볼 수 있다. 예를 들어, 주파수 5 GHz에서 종래의 마이크로스트립 선로의 경우, 선로파장 λ 는 21.12 mm이며 PACD 구조의 경우, $l_c = 30 \mu\text{m}$ 일 때의 선로파장 λ 는 1.71 mm이다. 또한, 그림 2.2.1에서와 같이, l_c 값이 커질수록 용량성분 C_b 가 증가하므로 파장이 감소하는 것을 볼 수 있다. 주파수 5 GHz에서, l_c 가 $10 \mu\text{m}$ 일 때 선로파장은 2.76 mm이고, l_c 가 $20 \mu\text{m}$ 일 때 선로파장은 1.99 mm이고, l_c 가 $30 \mu\text{m}$ 일 때 선로파장은 1.71 mm이다. 이러한 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 그림 2.1.2에서 보이는 l_c 가 커질수록 선로와 상부금속(ULM) 사이의 용량 C_c 가 커지므로, 식 (2.1.4)의 분모항이

커져 l_c 가 커질수록 파장이 감소하게 된다. 이는 종래의 PPGM 구조 [3, 4]의 선로파장 축소비율 20%보다도 훨씬 더 축소된 양이다. 상기 결과를 미루어 볼 때, PACD 구조를 이용하면 MMIC상에 초소형의 수동소자를 제작할 수 있음을 알 수 있다.

그림 2.2.2는 본 연구에서 제안한 PACD 선로 구조와 기존에 제안된 PPGM 선로 구조의 선로파장을 비교한 그래프이다. 그림 2.2.1과 2.2.2에서 알 수 있듯이 주파수 5 GHz에서 기존의 마이크로스트립 선로의 파장은 21.12 mm이고, PPGM 선로의 경우($T = 5 \mu\text{m}$ 일 때)는 4.46 mm로 20%의 파장 축소를 보였다. 이에 반해 본 연구에서 제안한 PACD구조의 선로의 경우는 $l_c = 30 \mu\text{m}$ 일 때, 선로 파장이 1.71 mm로 기존의 마이크로스트립 선로의 파장의 약 8%, PPGM 구조의 선로 파장의 38%정도로 축소됨을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안된 PACD구조가 PPGM구조의 선로에 비해 더 짧은 선로 파장을 가지고 있으므로, MMIC상에 초소형의 수동 소자를 제작함에 더 유리함을 알 수 있다.

그림 2.2.3은 PACD선로의 l_c 값의 변화에 따른 특성 임피던스의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. 그림 2.2.3에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제안하는 PACD 구조의 전송선로는 0 ~ 70 GHz의 범위에서 저임피던스의 특성을 보이고 있다. 구체적으로 0 ~ 70 GHz의 범위에서 l_c 가 10 μm 인 경우 40 Ω , 20 μm 인 경우 33 ~ 34 Ω , 30 μm 인 경우 31 ~ 30 Ω 이다. 또한, 주파수가 변화하더라도 임피던스의 변화는 매우 미미한 것을 알 수 있다. 이는 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스 식이 아래의 식 (2.2.1)과 같이 선로의 용량에 반비례하기 때문이다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2.1)$$

따라서 그림 2.1.1의 종래의 선로구조에 대한 특성 임피던스 Z_0 는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_a}} \quad (2.2.2)$$

이며, 그림 2.1.2의 주기적 접지구조를 삽입한 선로에 대한 특성 임피던스 Z_0 는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_a + 2C_c}} \quad (2.2.3)$$

가 되어, 주기적 접지구조를 삽입한 선로의 경우, 추가적인 용량 C_c 에 의해 특성 임피던스 Z_0 가 감소하게 된다.

이러한 결과는 MMIC 상의 수동소자 제작에 매우 유리한 점으로 작용한다. 왜냐하면, 최근 선로자체의 파장이 축소된 형태의 단파장 전송선로의 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 대표적인 구조로 PBG (photonic bandgap)와 DGS (Defected Ground Structure)가 있다. 하지만, 이러한 PBG나 DGS 구조의 경우는 축소된 선로파장으로 인해 소형화를 위한 전송선로로 사용가능하나, 10 GHz 이하의 낮은 공진주파수 특성으로 인해 그 이상대역에서는 필터로써 이용되어지는 문제점이 있으며, 공진구조에 의한 삽입손실이 증가하는 문제점도 존재

재한다. 또한, PBG 나 DGS 구조의 경우 축소된 선로파장으로 인해 높은 특성임피던스를 가지므로 저임피던스 정합소자 및 수동소자로는 적합하지 않다는 단점을 가진다. 따라서, 그림 2.1.2의 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 단파장 선로구조를 사용함으로써 저임피던스와 높은 공진주파수를 가지는 새로운 구조의 소형화된 전송선로를 이용하여 MMIC 상의 수동소자를 제작할 수 있게 되었다. 기존의 주기적 구조[5-9]의 경우, 주파수 변화에 따른 특성 임피던스 변화가 커서, 전송선로에는 응용되지 못하고 필터에 주로 이용되었다. 그러나 본 연구에서 제안하는 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로의 경우 주파수 변화에 따른 특성 임피던스의 변화가 미미하므로 전송선로에 이용될 수 있다.

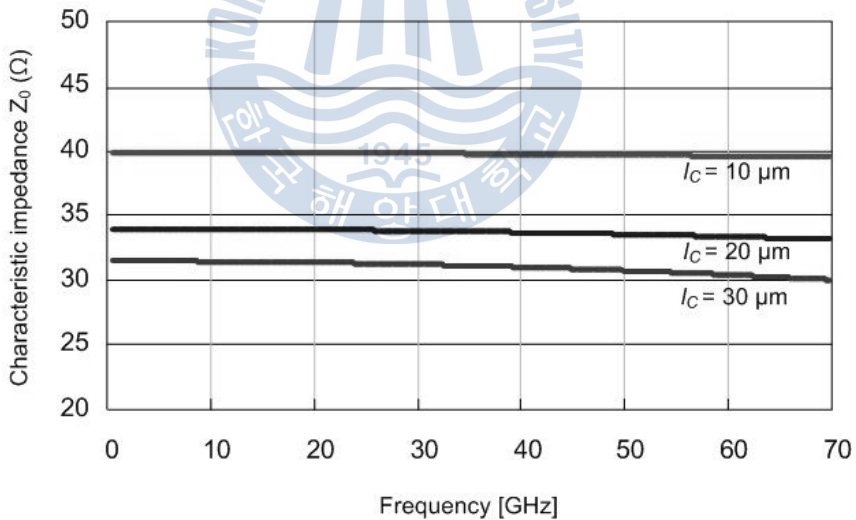


그림 2.2.3 The dependency of characteristic impedance on frequency of microstrip line employing PACD.

2.3 PACD 선로 구조의 손실, 전송상수, 유효유전율 특성

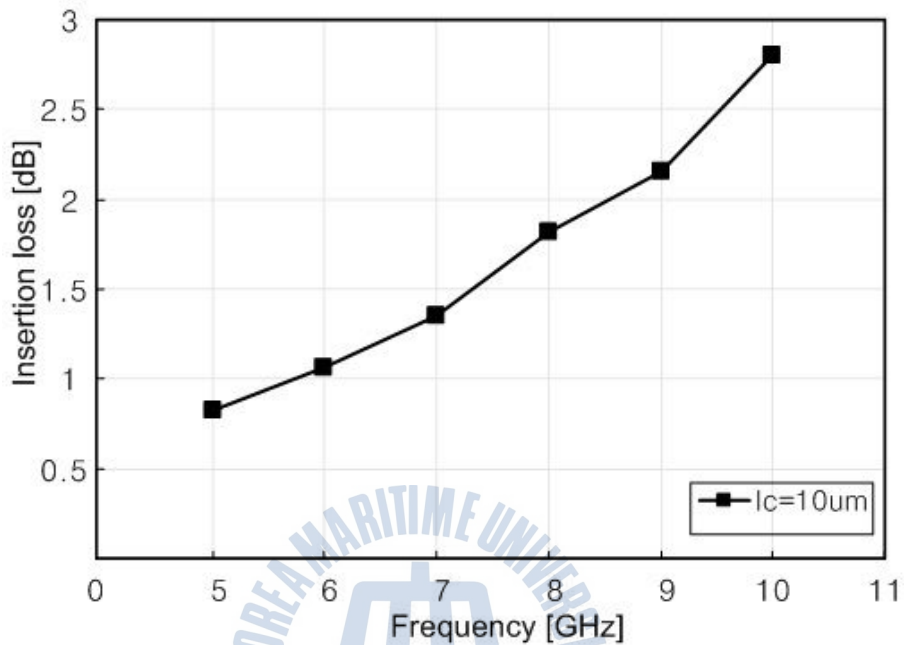


그림 2.3.1 Measured insertion loss of microstrip line employing PACD ($l_c = 10 \mu\text{m}$)

그림 2.3.1 은 PACD 구조에서 $l_c = 10 \mu\text{m}$ 이고, 길이가 0.5 mm인 전송선로의 손실을 보여준다. 그림 2.3.1에서 알 수 있는 바와 같이 0 ~ 5 GHz 대에서 약 -0.82 dB 이하의 선로 손실을 보이고, 5 ~ 10 GHz 대역에서는 약 -2.8 dB 이하의 손실을 보이고 있다. 이는, 기존의 마이크로스트립 선로보다 다소 높은 손실을 보여준다. 그러나, PACD 구조는 종래의 마이크로스트립 선로에 비해 파장이 줄어든 만큼 그만큼 손실도 줄어들 것으로 예상되므로 정확한 손실을 검토하기 위해서는 단위위상각 1°변화량에 대한 손실을 검토·비교하여야 한다. Table 2.3.1은 위상각 1°변화량에 대한 손실을 PACD 구조와 기존의

마이크로스트립 선로를 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 1°길이 당 기존 선로에 비해 0.0055 - 0.014 dB 정도의 약간의 손실이 더 발생한다. 이는 90°길이에 해당하는 $\lambda/4$ 선로에 대해, PACD 구조가 종래의 선로에 비해 0.49 - 1.26 dB정도 더 높은 손실이 발생함을 의미한다. 그러나, MMIC용 수동소자의 설계 시에 사이즈 축소효과를 고려하면 약간의 손실을 감안하더라도 수동소자의 제작에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2.3.1 Insertion loss of microstrip line employing PACD and conventional one.

구 분	f=5GHz	f=10GHz
conventional MST	-0.0072dB	-0.0068dB
PACD ($l_c = 10 \mu\text{m}$)	-0.0127dB	-0.0217dB

본 연구에서는 주기적 구조에 대한 측정 결과를 사용하여 종래의 미앤더 선로와 PACD 구조의 미앤더 선로에 대한 전송상수와 유효 유전율에 대한 기본특성을 고찰하고자 한다. 그림 2.3.1과 2.3.2는 각각 PACD 선로구조에 대한 전송상수와 유효유전율 측정결과이다. 유효유전율은 파장 측정결과로부터 다음의 식을 이용하여 계산되었다.

$$\epsilon_e = \left(\frac{2\pi}{\omega\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} \right)^2 \quad (2.3.1)$$

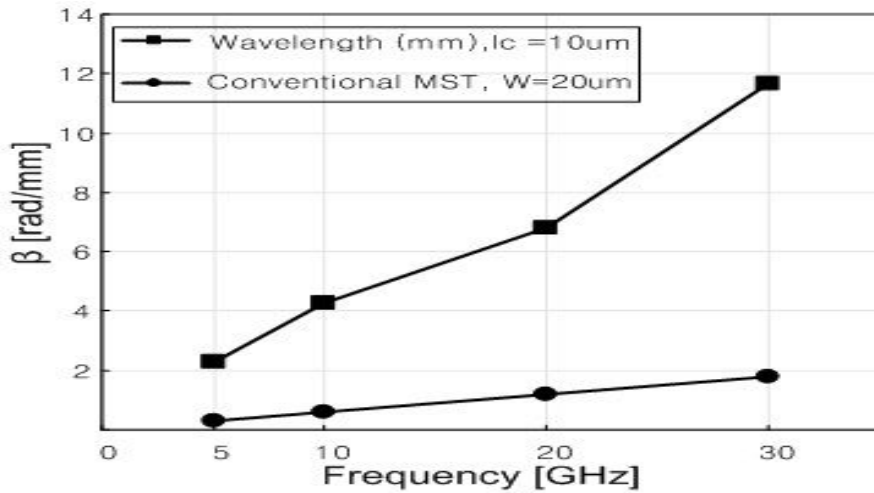


그림 2.3.2 Measured effective propagation constant of microstrip line employing PACD and conventional one.

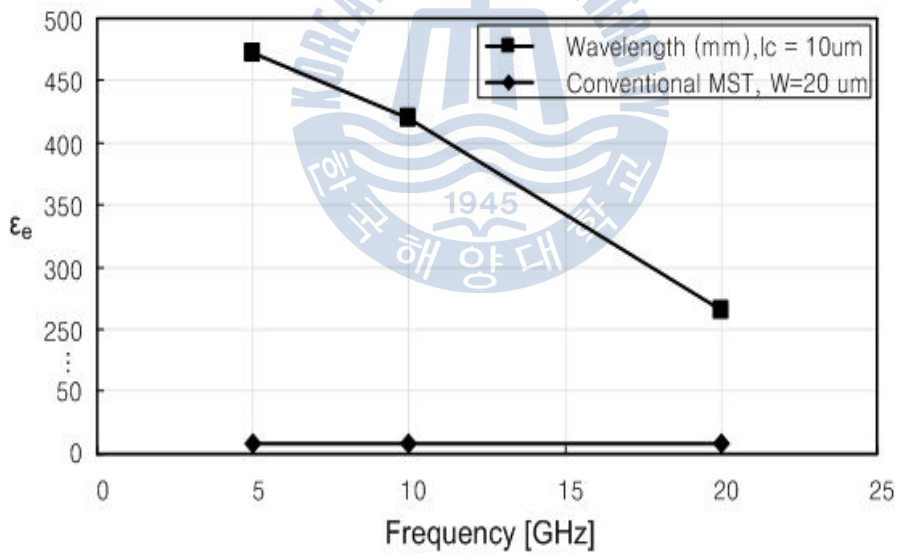


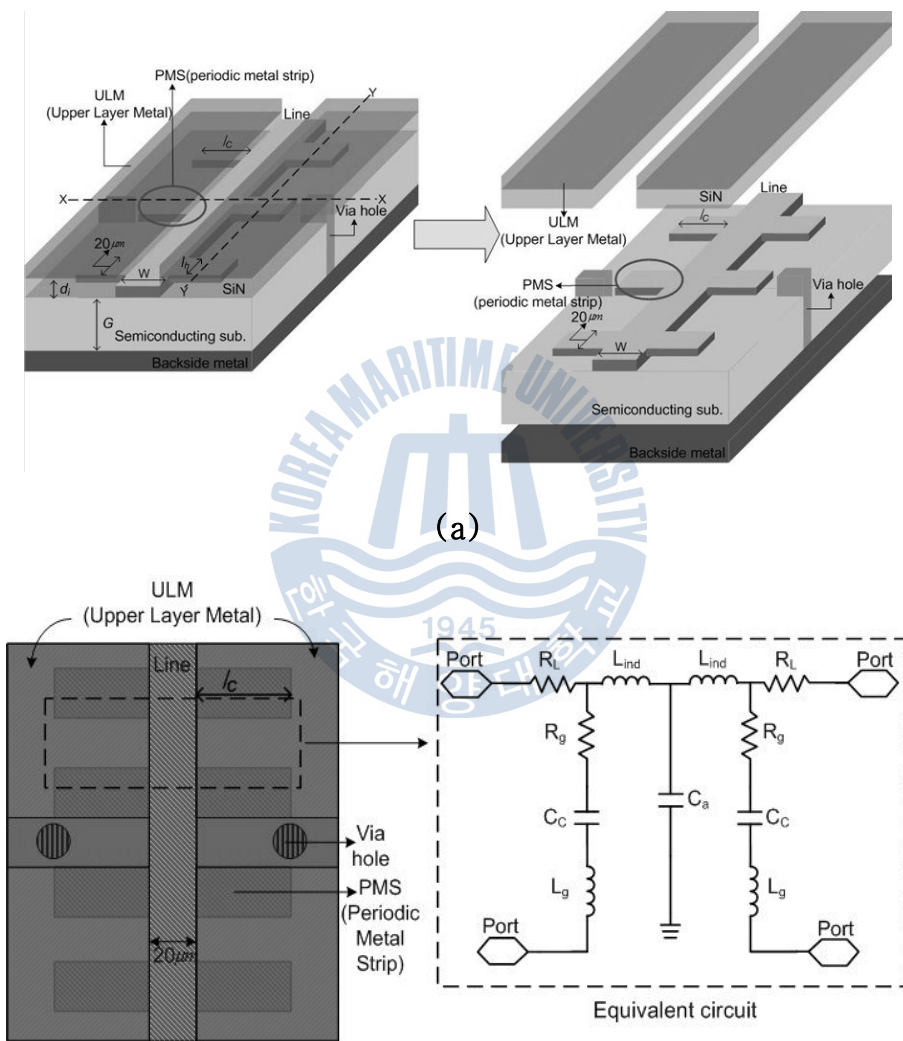
그림 2.3.3 Measured effective dielectric constant of microstrip line employing PACD and conventional one.

그림 2.3.2와 2.3.3에서 보는 바와 같이 기존의 미앤더 라인보다

PACD 구조의 경우가 훨씬 큰 전송정수 β 와 유효유전율 ϵ_e 을 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 다음과 같이 설명 될 수 있다. 즉, 기존의 미앤더 라인은 주기적 구조가 아닌데 반해 상기 선로는 주기적 구조이므로 β 값이 큰 slow-wave가 존재하며, T가 증가함에 따라 주기적인 용량 C_b 가 증가하므로 β 값이 더욱 큰 slow-wave가 존재하기 때문이다. 이러한 결과로부터, 단과장의 전송선로를 구현하기 위해서는 반드시 주기적인 구조가 필요함을 알 수 있다.



제 3 장 PACD 구조 선로의 등가회로를 이용한 이론적 해석



(b)

그림 3.1 (a) A structure of the microstrip line employing PACD.

(b) An equivalent circuit for unit cell of PACD structure.

주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로 구조의 공진 주파수를 해석하기 위해서는 일반적으로 전자계 해석을 이용해야 한다. 그러나 전자계 해석의 경우는 많은 시간이 소요되고, 이는 전체 RF 회로설계의 효율성을 떨어뜨린다. 이러한 문제의 해결하기 위하여, 본 절에서는 RF 수동 소자 개발에의 응용을 위하여, 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로를 등가회로를 이용하여 이론적으로 해석하였다. 구체적으로는 RLC 등가회로와 closed-form equation을 이용하였다. 그림 3.1은 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 등가회로의 단위 셀에 대한 등가회로를 보여준다. PMS(periodic metal strip)는 SiN 막과 GaAs 기판사이의 경계면에 삽입되어있다. 그리고 ULM(upper layer metal)은 비아 홀을 통해서 뒷면의 접지 금속막에 전기적으로 연결되었기 때문에 그라운드면의 역할을 한다.

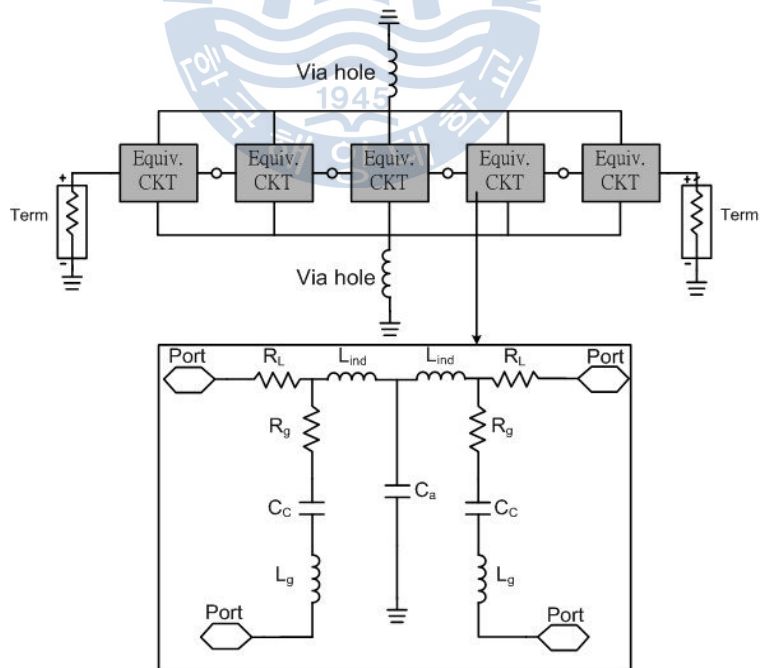


그림 3.2 An equivalent circuit of PACD structure.

그림 3.2는 PACD 선로구조에 대한 등가 회로를 보여주며, 그림 3.1의 네모 박스에 둘러싸인 주기적 구조의 N 번째 구성 요소의 등가 회로이다.

C_c 는 주기적인 금속 스트립 (PMS)와 ULM 사이의 용량 성분이다. 이것은 그림 3.1에 나타난다. 그리고 상기용량 C_c 는 PMS의 넓이인 $l_h \cdot l_c$ 에 비례한다(그림 3.1(a)에서 보는 것처럼 l_h 와 l_c 는 각각 PMS의 폭과 길이이며 l_h 는 $20 \mu\text{m}$ 이다). R_g 와 L_g 는 각각 폭 l_c 를 가지는 PMS의 주기적인 스트립의 손실과 전류 흐름에서 비롯된 인덕턴스이다. C_a 는 선로와 GaAs 기판 뒷면의 접지 금속막 사이에 정전용량과 일치한다. 그리고 L_{ind} 와 R_L 은 각각 선로에서 발생하는 인덕턴스와 저항성분이다.

그림 3.2에서는 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로의 단위 셀을 전체 구성요소 수만큼 등가회로를 연결하며, 그라운드 포트끼리는 서로 연결하고 실제 주기적인 금속 스트립을 삽입한 구조의 비어홀이 위치하는 부분에 비어홀의 등가 인덕터를 연결한다. 그림 3.2에서 보이는 각각의 RLC 값은 측정값과 등가회로로부터 계산 값과의 curve-fitting으로 구하였으며 다음과 같다.

$$L_{ind} = \left[0.0262 + 0.0215 \times \left(\frac{l_c}{W} \right) - 0.0215 \times \left(\frac{l_c}{W} \right)^2 \right] (nH) \quad (3.1)$$

$$C_a = \left[0.215 - 0.775 \times \left(\frac{l_c}{G} \right) + 3.25 \times \left(\frac{l_c}{G} \right)^2 \right] (pF) \quad (3.2)$$

$$C_c = \left[0.45 - 0.194 \times 10^{-2} \times \left(\frac{l_c}{d_i} \right) + 0.48 \times 10^{-5} \times \left(\frac{l_c}{d_i} \right)^2 \right] (pF) \quad (3.3)$$

$$R_L = \left[-0.05 \times \left(\frac{W}{l_c} \right) + 0.6 \right] (\Omega) \quad (3.4)$$

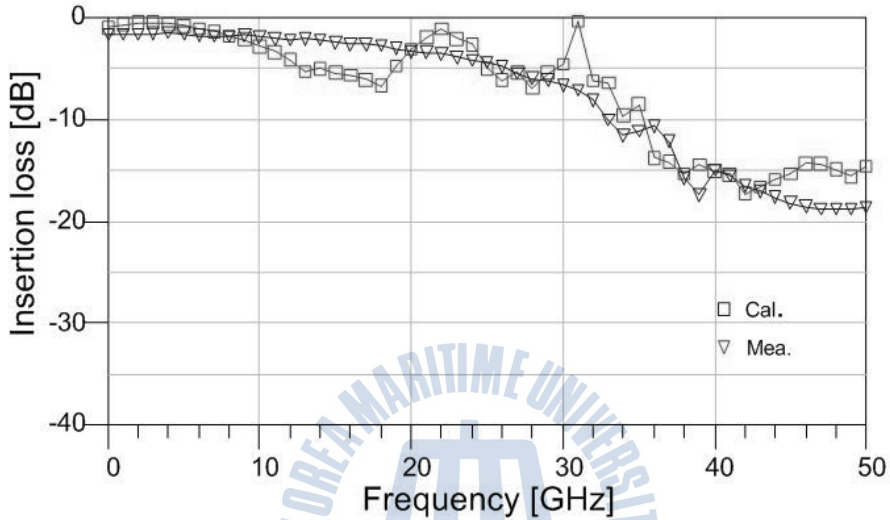
$$R_g = \left[0.885 - 0.38 \times \left(\frac{l_c}{l_h} \right) + 0.26 \times \left(\frac{l_c}{l_h} \right)^2 \right] (\Omega) \quad (3.5)$$

$$L_g = \left[-0.0646 + 0.1364 \times \left(\frac{l_h}{l_c} \right) + 0.0398 \times \left(\frac{l_h}{l_c} \right)^2 \right] (nH) \quad (3.6)$$

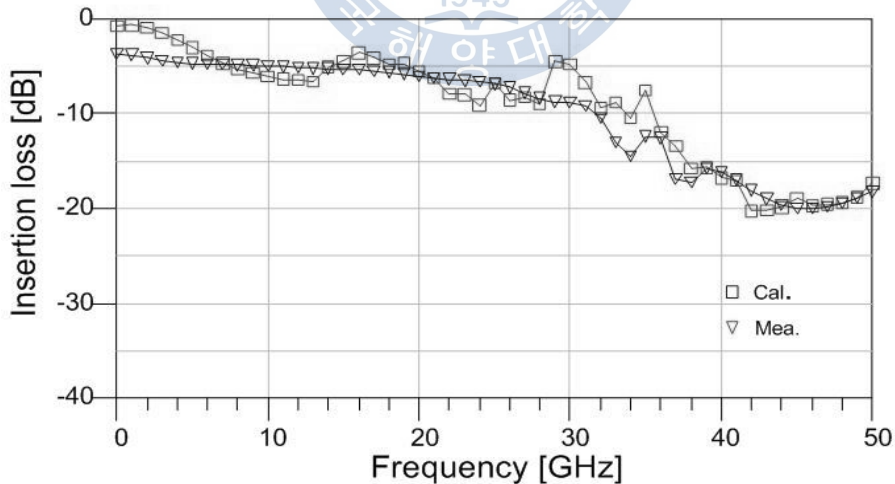
식 (3.1) ~ (3.6) 에 있는 W , l_c , d_i 는 각각 선로의 길이, PMS의 길이, 삽입된 SiN 필름의 두께를 의미한다. 또한, G 는 선로와 접지 금속 사이의 간격, 즉 GaAs 기판의 두께를 의미하며, l_h 는 PMS의 폭을 의미한다. 본 연구에서 제안한 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 전송선로는 $G = 500 \mu\text{m}$, $W = 20 \mu\text{m}$, $l_h = 20 \mu\text{m}$, $d_i = 500 \text{ nm}$ 이다. 식 (3.3)에서 $(l_c/d_i)^2$ 이 포함되어 있는 이유는 기생 용량성분으로 인한 기생성분에서 비롯된 비선형성이 존재하기 때문이다.

본 절에서는 PACD 선로 구조의 등가회로와 closed-form equation 을 이용하여 PACD 선로 구조의 RF 특성을 측정값과 계산값을 이론적으로 연구하였다. 그림 3.3(a) 와 3.4(b) 는 PACD 선로 구조의 삽입 손실의 측정된 값과 계산된 수치를 PMS의 길이에 따라 비교한 그림이다. 계산의 결과를 위하여 PACD 선로 구조의 등가회로와 closed-form equation을 이용하였다. 그림 3.3 과 3.4에서 알 수 있

뜻이, 주파수 50 GHz 이하에서 PMS의 길이(l_c)가 10, 20 μm 일 때, 계산된 수치와 측정된 값이 양호한 RF 특성을 나타내었다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 측정결과와 계산결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.3 (a)Insertion loss of PACD structure($l_c=10\ \mu\text{m}$). (b)($l_c=20\ \mu\text{m}$)

제 4 장 PACD 구조 선로의 초소형 수동소자 개발에의 응용

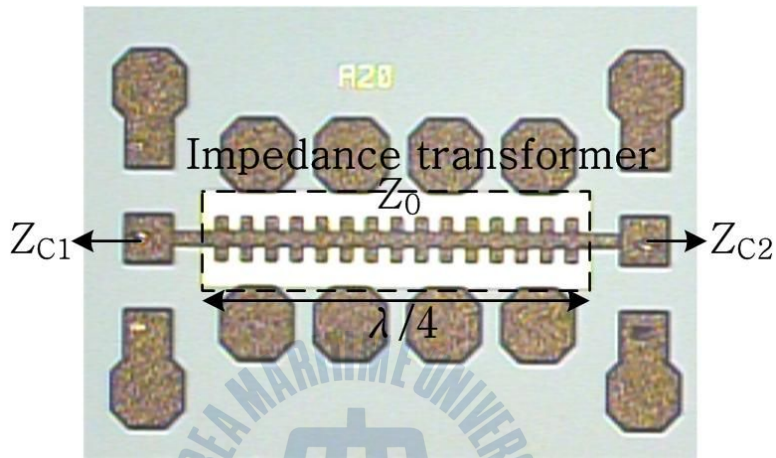


그림 4.1 A photograph of impedance transformer employing PACD structure.

본 연구에서는 초소형 RF 수동소자의 개발을 위하여 상기 PACD 구조를 사용하여 GaAs MMIC상에 초소형임피던스 변환기를 제작하였다. 그림 4.1 은 PACD 구조의 선로를 이용하여 제작한 임피던스 변환기 사진을 보여준다. PACD 구조에서는 PMS의 길이 l_c (그림 2.2 참조)이 커질수록 선로와 PMS 사이에서 생기는 정전용량 C_c 는 증가하게 되며, 그 결과 식 (2.1.1)과 (2.1.3)으로부터 특성 임피던스 Z_0 값은 줄어들게 됨을 알 수 있다. 따라서, PMS의 길이 l_c 를 조절하면 특성 임피던스를 자유롭게 변화 시킬 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 특성 임피던스 Z_{C2} 에서 Z_{C1} 으로의 변환을 위한 임피던스 변환

기를 제작하였다. 특성 임피던스 Z_{C2} 에서 Z_{C1} 으로의 변환관계식[4]을 만족시키기 위해서는 임피던스 변환기의 특성임피던스 Z_C 는 아래의 식이 만족되어야 한다.

$$Z_C = \sqrt{Z_{C1}Z_{C2}} \quad (4.1)$$

본 연구에서는 $Z_{C1} = 12 \Omega$, $Z_{C2} = 5 \Omega$ 이며, 중심주파수는 7 GHz 인 임피던스 변환기를 제작하였으며 l_c 의 길이는 10 μm 이다. Table 2는 기존의 마이크로스트립 선로를 이용해서 제작한 임피던스 변환기와 본 논문에서 제안된 PACD선로 구조를 이용한 임피던스 변환기를 비교한 것이다. 표 4.1에서는 PACD 선로 구조의 임피던스 변환기에 대해, 비어홀이 포함된 경우와 포함되지 않은 경우를 모두 나타내었다. 실제 회로상에서 접지가 연결된 경우, 접지 한 곳에서만 비어홀을 비치하면 되므로 실제로 비어홀을 포함하지 않은 경우가 실제 사이즈가 된다. 비어홀을 포함한 경우는 면적이 0.231 mm^2 로 기존의 임피던스 변환기 면적의 5.24%가 되고 비어홀을 포함하지 않은 경우의 면적은 0.042 mm^2 로 기존의 마이크로스트립 선로 임피던스 변환기 면적의 약 0.95%정도의 크기로 줄어든다.

그림 4.2 는 PACD 선로 구조로 제작된 임피던스 변환기의 RF특성이다. 그림에서 보는 바와 같이 중심 주파수 7 GHz에서 -29 dB 정도의 반사 손실과 -2 dB 이하의 삽입 손실특성이 관찰되며, 3.8 - 9.2 GHz 대역에 걸쳐서 -10 dB이하의 반사손실과 -1.5 \pm 0.5 dB 정도의 삽입손실 특성이 관찰된다. 이와 같은 PACD 구조를 이용한 초소형 임피던스 변환기의 특성은 MMIC 상에서 RF 소자간의 임피던스

정합에 매우 유용하게 사용될 수 있음을 의미한다.

Table 4.1 Size of the impedance transformer employing microstrip line with PACD and conventional one.

구 분	W	$\lambda/4$	SIZE
conventional MST	1.17 mm	3.77 mm	4.41 mm ²
PACD (비어홀 포함)	0.385 mm	0.6 mm	0.231 mm ²
PACD (비어홀 불포함)	0.07 mm	0.6 mm	0.042 mm ²

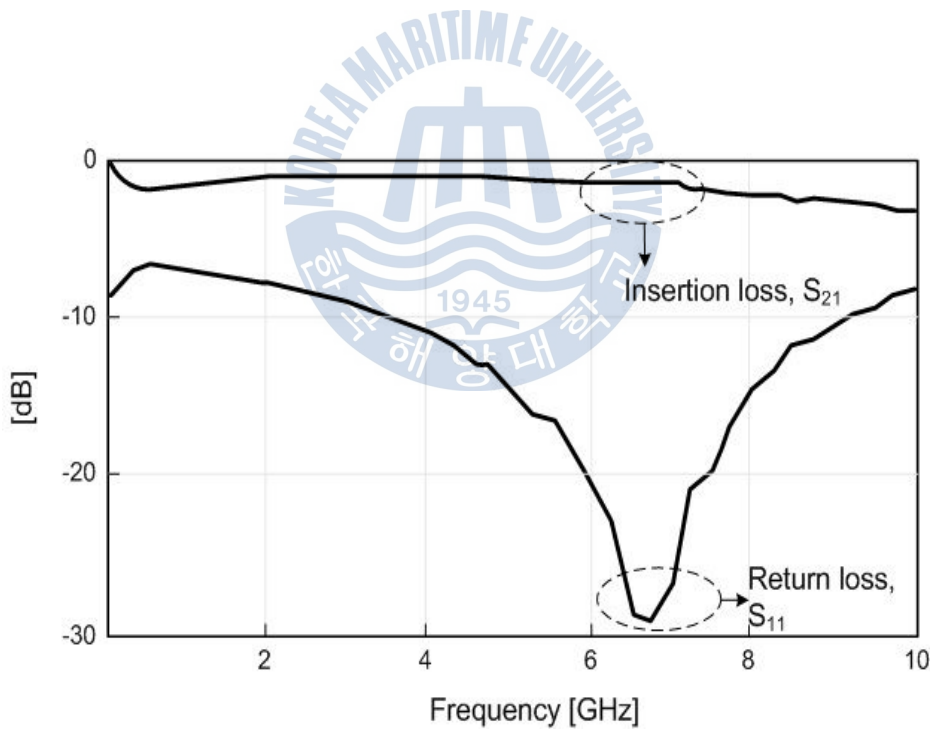


그림 4.2 Measured insertion and return loss of the impedance transformer employing PACD

제 5 장 결 론

21세기에 들어선 이후, 유비쿼터스 서비스가 가능한 정보통신기술의 발전은 IC(integrated circuit) 기술의 급격한 발전을 초래하였다. 이에 따른 단말기의 소형화, 고집적화가 RF 부품시장에서 요구되어지고 있으며, 그 중 RF 송수신단은 수동소자를 다량 집적한 고집적 단말기가 요구되어지고 있는 추세이다.

이에 본 연구에서는 PACD 구조를 이용하여 GaAs MMIC용 단파장 전송선로 구조를 개발하였다. PACD 구조를 사용하는 경우의 선로 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 8 %로 축소되었다. 상기 PACD 선로구조는 이제까지 발표된 주기적 구조의 선로중에서 가장 짧은 파장특성을 보여준다. $\lambda/4$ 선로에 대해, PACD 구조가 종래의 선로에 비해 0.49 - 1.26 dB정도의 약간 더 높은 손실이 발생하였다. 그리고, 주기적 구조의 slow-wave 특성에 의해 PACD 구조는 종래의 마이크로스트립 선로에 비해 훨씬 더 높은 전파상수와 유효 유전율 값을 보였다.

또한, 본 연구에서는 상기 PACD 구조를 등가회로와 closed-form equation을 이용하여 이론적으로 해석하였다. 삽입 손실의 측정결과와 등가회로 및 closed-form equation을 이용하여 계산한 수치를 비교한 결과 주파수 50 GHz 이하의 대역에서 양호한 RF 특성을 나타내었다.

상기 PACD 구조를 이용하여 GaAs MMIC상에 임피던스 변환기를 제작한 결과, 점유면적은 종래의 마이크로스트립 선로 임피던스 변환

기 면적의 약 0.95% 정도로 대폭 축소되었다. 상기 임피던스 변환기 광대역에 걸쳐서 양호한 RF 특성을 보였다. 구체적으로 중심 주파수 7GHz에서 -29 dB정도의 반사 손실과 -2dB 이하의 삽입 손실특성이 보였으며, 3.8 - 9.2 GHz 대역에 걸쳐서 -10 dB이하의 반사손실과 -1.5 ± 0.5 dB정도의 삽입손실 특성을 보였다. 상기의 결과로부터, PACD 구조를 이용한 전송선로는 GaAs MMIC용 초소형 온칩 수동소자 및 정합소자에 매우 유효하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.



참 고 문 헌

- [1] A. A. Abidi, "RF-CMOS Comes of Age", IEICE Trans. Electron., vol.E87-C, no. 6, pp.840-853, Jun. 2004.
- [2] J. R. Long, "Passive Components for Silicon RF and MMIC Design", IEICE Trans. Electron., vol. E86-C, no. 6, pp.1022-1031, Jun. 2003.
- [3] Y. 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 Trans Microwave Theory Tech, 53, pp.1951-1959, June 2005.
- [4] 윤영, "GaAs MMIC상에서 주기적으로 천공된 홀을 가지는 접지 금속막 구조를 이용한 전송선로 특성연구 및 코프레너 선로를 이용한 온칩 초소형 임피던스 변환기에의 응용", 한국마린엔지니어링학회지, 第32卷 第8號p.160-168, 2008.
- [5] Y. Yun, "A Fully-integrated broadband amplifier MMIC employing a novel chip size package", IEEE Trans Microwave Theory Tech. Vol 50, pp.2930~2937, 2002.
- [6] D.M. Pozar, "Microwave engineering", 2nd ed..Chapter 4, Addison-wesley, 1990
- [7] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of low-pass filter using the novel microstrip defected

ground structure,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.49, pp. 86-93, Jan. 2001.

[8] A.Lai, and T. Itoh, “Microwave composite right/left-handed metamaterials and devices,” in *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, Suzhou, China, Dec. 2005, pp. 31-34.

[9] J. Gao, and L. Zhu, “Per-Unit-Length Parameters of 1-D CPW Metamaterials with Simultaneously Series-C and Shunt-L Loading,” in *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, Suzhou, China, Dec. 2005, pp. 39-42.

[10] F. R. Yang, K. P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, “A UC-PBG structure and its applications for microwave circuits,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1509-1514, Aug. 1999.

[11] A. S. Andrenko, Y. Ikeda, and O. Ishida, “Application of PBG microstrip circuits for enhancing the performance of high-density substrate patch antennas,” *Microwave Opt. Tech. Lett*, vol. 32, no.5, pp.340-344, Mar.2002

감사의 글

2년간의 석사 과정을 주위의 많은 도움으로 잘 마무리하게 되었습니다. 먼저 본 논문이 완성되기까지 늘 따뜻하게 배려해 주시고 용기를 잃지 않게 웃으시면서 도와주시고, 세심한 조언을 아끼지 않으신 윤 영 교수님께 감사드립니다. 그리고 논문의 미비한 점을 보완하여 충실한 내용이 될 수 있도록 해주신 강인호 교수님과 강석엽 박사님께 감사드리며, 학부와 석사과정 동안 항상 새로운 가르침과 조언을 아끼지 않으셨던 김동일 교수님, 조형래 교수님, 정지원 교수님, 김기만 교수님, 민경식 교수님께도 감사드립니다.

처음에 실험실에 들어와서 아무것도 모르면서 막무가내로 열심히만 연구와 설계를 할 때 뒤에서 많은 도움을 줬던 동기 정갑이, 1년 늦게 들어와서 굶은 일 다한 의훈이, 석사 과정이 끝날 때 입실한 성조. 말썽 일으키지 않고 지시에 따라 준 점에 감사합니다. 그리고, 대학원 생활에 조언을 아끼지 않으신 동식이형, 정우형, 민혁이형, 태두형, 동수에게 무한 감사를 드립니다. 후배이면서 동갑인 정원이, 4차원 같은 찬진이, 병수 모두 감사드립니다. 티격태격하면서도 하는 일에 조언을 아끼지 않고 독려해주신 전과과 미녀 조교 은정이 누님께 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 항상 뒤에서 아낌없는 사랑과 믿음을 보여주시는 사랑하는 어머니, 석사의 마지막에 만나 용기를 듬뿍 담아준 나의 유딩, 구혜정. 사랑합니다.

이러한 사랑에 보답하기 위해서 더욱 열심히 노력하겠습니다.