

저손실 단파장 특성을 가지는 반전된 형태의 주기적 용량성 선로구조와 MMIC상의 초소형 수동소자 개발에의 응용

윤 영†

(원고접수일 : 2011년 4월 15일, 원고수정일 : 2011년 6월 24일, 심사완료일 : 2011년 7월 7일)

A Low Loss and Short-wavelength Transmission Line Employing Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices and Its Application to Miniaturized Passive Components on MMIC

Young Yun†

요 약 : 본 논문에서는 기존의 PACD (Periodically Arrayed Capacitive Devices) 선로구조가 가지는 고 손실 특성의 문제점을 개선하기 위하여, 단파장 특성이 있는 Inverted PACD 구조를 제안하였다. Inverted PACD 선로구조의 손실특성은 종래의 PACD 구조와 비교하여 훨씬 개선되었으며, 구체적으로 $\lambda/4$ 의 길이를 가지는 Inverted PACD 선로구조의 손실특성은 4GHz에서 0.41dB이다. 그리고 상기 Inverted PACD 선로구조는 종래의 마이크로스트립 선로보다 단파장 특성을 보여주었으며, 구체적으로 종래의 전송선로 파장의 11.85%로 파장이 대폭 축소되었다. MMIC용 초소형 수동소자로서의 응용가능성을 제시하기 위하여, Inverted PACD 선로구조를 이용하여 GaAs MMIC상에 임피던스 변환기를 제작 및 측정하였다. 그 결과 Inverted PACD 선로구조를 이용하여 제작한 임피던스 변환기의 크기는 0.012 mm^2 이며, 종래의 임피던스 변환기 크기의 1.7%의 면적을 차지하였다. 상기 임피던스 변환기는 2.25~6.5GHz 대역에서 -10dB 이하 반사손실과 -1dB이하의 삽입손실 등 양호한 RF 특성을 보여주었다.

주제어 : 저손실, 단파장, MMIC, PACD, 전송선로

Abstract: In this study, we propose a novel transmission line employing inverted PACD (Periodically Arrayed Capacitive Devices) for application to a development of miniaturized passive components on MMIC. The novel microstrip line employing Inverted PACD structure showed a loss much lower than conventional microstrip line. Using the inverted PACD structure, we fabricated a miniaturized impedance transformer on MMIC. the size of the impedance transformer was 0.012 mm^2 , which is only 1.7% of conventional one. The impedance transformer showed good RF performances in a frequency range of 2.25~6.5 GHz.

Key words: Low loss, Short-wavelength, MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit), PACD (Periodically Arrayed Capacitive Devices), Transmission line

1. 서 론

최근 모든 전자기기의 개발에서 무선통신기술의 접목이 필수적인 요소가 됨에 따라 다양한 형태의 전자기기에 응용 가능한 무선 단말기의 개발이 요

구되고 있다. 일반적으로 휴대성이 강조되는 휴대폰, PDA 등과 같은 무선 단말기에서부터 블루투스 이어폰, 소형 무선 스피커 등과 같은 액세서리에 이르기까지 더욱 소형화되고 성능 좋은 무선통신

† 교신저자(한국해양대학교 전파공학과, E-mail:yunyoung@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4426)

기술의 개발이 필요한 시점이다. 따라서 전체적인 무선통신기기의 소형화를 위해서는 단말기 칩 내부에서 큰 면적을 차지하는 수동소자를 소형화하고 집적화하는 것이 궁극적인 해결책이 될 수 있다.

특히, 결합기 및 분배기, 필터 등 대부분의 수동소자는 디지털 단, 아날로그 단보다 상대적으로 높은 주파수대를 사용하는 RF 단에서 그 크기가 매우 커져 일반적으로 MMIC 내부에 집적되지 못하고 MMIC 외부의 프린트 기판 상에 설계 및 제작되어 전체적인 시스템의 크기를 커지게 하고 복잡하게 하는 주요 원인이 되고 있으므로 [1, 2], 위의 문제점을 해결하기 위해서는 RF 주파수 대역에서 MMIC 내부에 집적 가능한 소형의 수동소자 개발이 필수적이다.

이를 위하여 DGS(Defected Ground Structure), PBG(Photonic Band-gap)과 같은 구조가 개발되었으며 최근에는 PPGM(Periodically Perforated Ground metal) 선로구조, PACD(Periodically Arrayed Capacitive Devices) 선로구조 와 같이 기존의 구조에 추가로 주기적인 용량성 부분을 삽입하여 선로 파장을 줄이는 구조에 대한 연구가 계속해서 진행되고 있다[1-8]. 이제까지 개발된 주기적 선로구조 중에서 PACD 선로구조는 가장 짧은 파장특성을 보여주었으며, 온 칩형 소형수동소자의 개발에 용이하게 사용될 수 있음을 확인하였다[9]. 그러나 이런 장점에도 기존의 PACD 구조는 구조적인 문제점 때문에 비교적 높은 손실특성을 보여주었다.

본 연구에서는 종래의 PACD 선로구조[9]를 개선하여 저손실 특성이 있는 단파장 PACD 선로구조를 개발하였다. 상기 선로구조는 4GHz에서 0.41dB의 저손실특성을 보여주었으며, 종래의 전송선로에 비해 훨씬 짧은 파장특성을 보여주었다. 상기선로구조를 이용하여 제작한 임피던스 변환기의 면적은 0.012mm²이며, 이는 종래의 임피던스 변환기의 1.7%이다.

2. 종래의 PACD 선로구조

Figure 1은 종래의 마이크로스트립 선로구조와 이에 대한 등가회로를 보여준다.

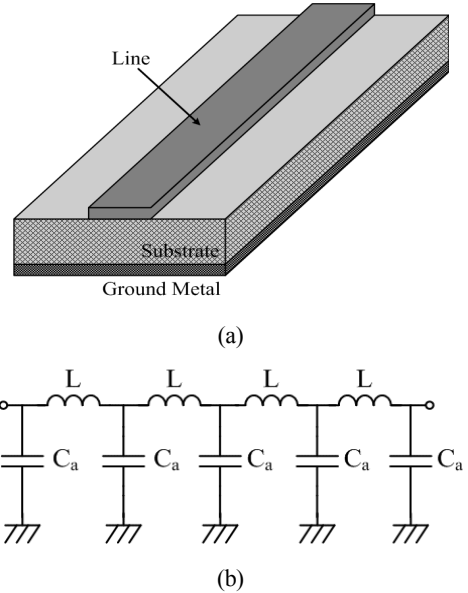


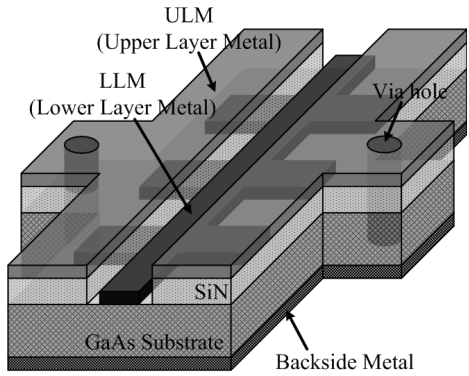
Figure 1: (a) Structure of conventional microstrip line (b) its equivalent circuit

기존의 GaAs 반도체 상의 마이크로 스트립 구조에서 선로와 접지 금속 막 사이에 발생하는 전계에 의해 단위 길이 당 정전용량 C_a 가 존재하며, 선로 상에 흐르는 전류에 의해 인덕턴스가 발생한다. 따라서 Figure 1 (a)에 나타난 것과 같은 기존의 마이크로파 전송선로는 Figure 1 (b)와 같이 주기적인 LC 병렬회로와 등가이다. 따라서, Figure 1에서 나타난 기존의 마이크로 스트립 선로의 특성 임피던스 Z_0 와 선로 파장 λ_g 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다[4].

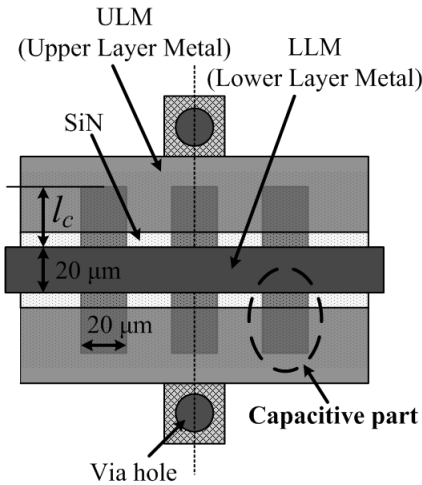
아래 식에서 L과 C는 각각 선로의 단위 길이 당 발생하는 인덕턴스와 커패시턴스 값에 해당하며, f는 동작 주파수이다. 식 (1)과 (2)로부터 선로와 접지 금속사이의 용량 C가 증가할수록 선로 파장 λ_g 는 감소하므로, 선로 파장을 축소하기 위해서는 선로와 접지 사이에 추가로 용량성 소자를 접속해야 함을 알 수 있다[4]. 본 연구그룹은 상기 특성을 이용하여 선로와 접지 금속 사이의 주기적인 용량성 소자가 첨가된 단파장 전송선로를 개발하였다[9].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{1}$$

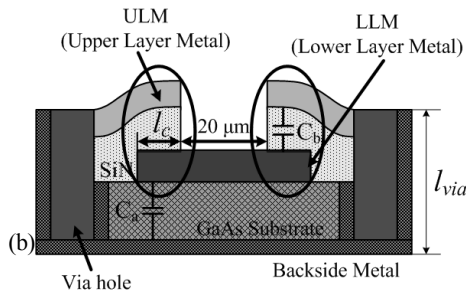
$$\lambda_g = \frac{1}{f\sqrt{LC}} \quad (2)$$



(a)



(b)



(c)

Figure 2: (a) The structure of microstrip line employing PACD, (b) Top view of microstrip line employing PACD, (c) Cross-sectional view according to X-X direction

Figure 2 는 본 연구 그룹은 제안한 PACD 선로 구조를 보여준다[9]. **Figure 2**에서 보이는 바와 같이 기존의 마이크로 스트립의 선로에 비해 주기적으로 추가적인 용량 성분을 가지게 하기 위하여 ULM(Upper Layer Metal)과 LLM(Lower layer Metal)이 겹치는 부분이 생기도록 설계하였으며 ULM과 LLM 사이에는 SiN 층을 삽입하였다. 또한, 뒷면의 접지 금속 막(Backside Metal)과 ULM은 Via hole을 통하여 접지된 형태이다. 이러한 구조적인 변화에 따라 **Figure 2** 에서 보이는 PACD 구조는 종래의 마이크로 스트립 선로와 달리 ULM과 LLM이 겹치는 부분에서 추가로 정전용량 C_b 가 발생하게 된다. 따라서 종래의 마이크로스트립 선로구조는 식 (1), (2)에서 $C=C_a$ 지만, 상기 PACD 구조에서는 식 (3), (4)와 같이 $C=C_a+C_b$ 가 되므로 결과적으로 PACD 구조를 이용한 선로의 특성 임피던스 Z_0 와 선로 파장 λ_g 가 작아지는 결과를 보이게 된다[4].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_a + C_b}} \quad (3)$$

$$\lambda_g = \frac{1}{f\sqrt{L(C_a + C_b)}} \quad (4)$$

상기 특성에 의해 PACD선로구조는 종래의 마이크로스트립 선로에 비해 훨씬 짧은 파장특성을 보여주었다[9]. 반면, 상기 PACD 선로 구조는 종래의 마이크로 스트립 선로와 비교하면 큰 손실을 가진다. 그 이유는 **Figure 2**의 PACD 구조에서 전자파가 진행되는 선로부분인 LLM의 두께가 1 μ m 정도로 매우 얇아 전자파의 손실이 매우 크기 때문이다. 즉, **Figure 2**의 PACD 구조에서 LLM 이 선로 층으로 사용되는데, ULM과 LLM 사이에 SiN가 존재하므로 LLM의 두께가 커지면, **Figure 2** (c)의 동그라미로 표시한 부분의 SiN 층과 ULM 층에 강한 stress가 걸려 양질의 유전체 막을 얻을 수 없다. 따라서, 상기 문제점을 해결하기 위해서는 전자파가 진행되는 선로부분인 LLM의 두께가 1 μ m 정도로 매우 얇아야 하며, 이 때문에 LLM 부분의 표면저항이 증가하여 전자파 손실이 매우 커지게 된다[9]. 또한, 종래의 PACD 구조의 경우 Via hole의 길이가 길며, 이 때문에 Via hole로부터 발생 되는 기생

성분 때문에 추가적인 손실이 발생하게 된다. 즉, 접지 전위를 공급하기 위해 Via hole을 통해서 ULM과 Backside Metal을 연결해야 하는데, **Figure 2 (c)**에서 보는 바와 같이 Via hole은 SiN 박막과 GaAs 반도체 기판 모두를 관통해야 하므로, Via hole의 길이 (l_{via})가 SiN 박막과 GaAs 반도체 기판 두께만큼 길어지게 되며, 이 때문에 다량의 기생 인덕턴스가 발생하게 된다. 이러한 기생 인덕턴스는 마이크로파 소자의 고주파 특성을 크게 저해하는 것으로 알려졌다[10].

본 논문에서는 Inverted PACD(Inverted Periodically Arrayed Capacitive Devices) 구조를 제안함으로써 종래의 PACD와 같은 저임피던스, 단파장 특성을 보이면서도 손실이 적은 전송선로 구조를 제안한다.

3. Inverted PACD

3.1 Inverted PACD의 선로구조

Figure 3 (a), (b), (c)는 본 논문에서 제안하는 Inverted PACD의 구조를 각각 전체, 위에서 본 구조, X-X 방향의 단면으로 나타낸 그림이다. 기존의 PACD 구조와 마찬가지로 Inverted PACD 구조에서도 종래의 마이크로 스트립 선로에서 존재하는 정전용량 C_a 이외에 추가적인 C_b 가 발생하는데, **Figure 2 (c)**에서 나타낸 ULM과 LLM 사이에 존재하는 추가적인 용량 C_b 와 마찬가지로 **Figure 3 (c)**에도 추가적인 정전용량 C_b 가 존재하게 되므로 기존의 PACD 구조에서와 같은 단파장-저임피던스 특성을 보인다. 그러나 Inverted PACD 구조에서는 앞서 설명한 기존의 PACD 구조의 전송선로 부분이 얇아짐에 따라 손실이 커지는 문제점을 개선하기 위하여 상부 전극 층을 전자파가 진행하는 전송선로로 사용하는 구조로 선택하였다. 상부전극을 전자파가 진행하는 전송선로로 사용하여 전송선로의 두께를 두껍게 하면 표면저항이 감소하여 손실이 감소한다. 그리고 **Figure 2**의 구조에서 설명한 바와 같이 유전체 부분의 stress는 하부전극 LLM의 두께에 의해 유전체 부분에 stress가 발생하는 것이므로, **Figure 3**의 구조에서 하부전극 LLM의 두께를 1 μ m 정도로 매우 얇게 유지하면 상부전극 ULM의 두께를 아무리 두껍게 하여도 유전체 부분에 stress가

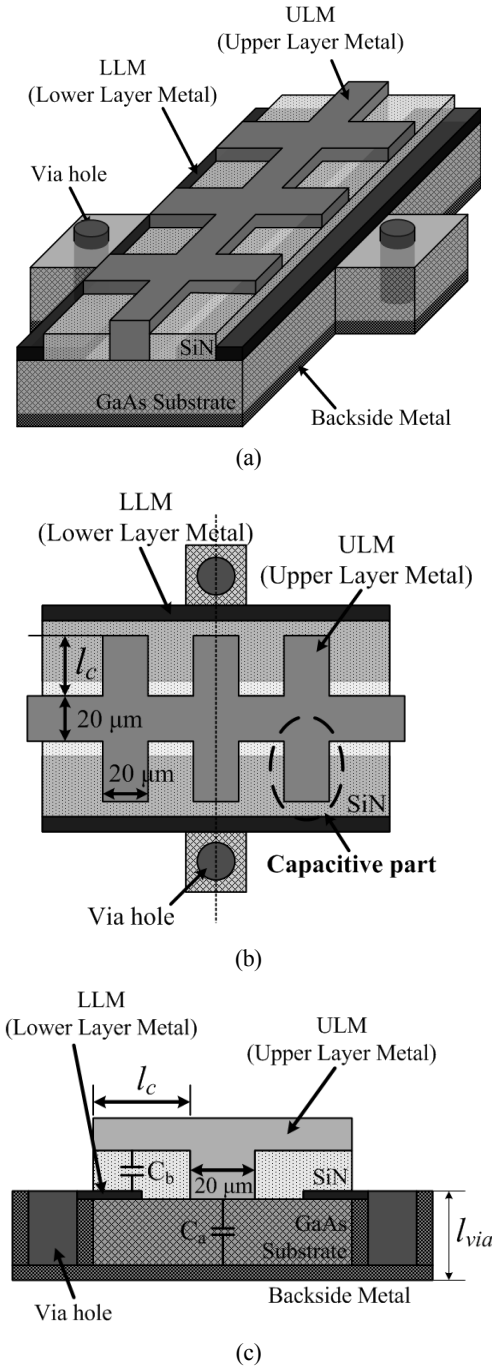


Figure 3: (a) The structure of microstrip line employing Inverted PACD, (b) Top view of microstrip line employing Inverted PACD, (c) Cross-sectional view according to X-X direction

걸리지 않고 양질의 막을 얻을 수 있다. 따라서 Inverted PACD 구조에서는 두꺼운 상부 전극 층을 전송선로로 사용하기 때문에 PACD 구조에 비해 선로의 손실이 대폭 줄어들게 된다. 본 연구에서는 Inverted PACD 구조의 상부전극 층 ULM의 두께를 5.5 μm 로 제작하였다. 그리고 Inverted PACD 구조에서는 접지면과 접속되는 하부전극 층 LLM이 유전체 아래에 있으므로, 하부전극 층 ULM과 Backside Metal을 연결하는 Via hole은 GaAs 기판 층만 관통한다. 따라서, Via hole이 유전체 박막과 반도체 기판을 모두 관통하는 종래의 PACD 구조에 비해 Via hole의 길이 l_{via} 가 짧아지므로, Via hole에 의한 기생인덕턴스가 감소하고, 이 때문에 추가로 손실이 더욱 감소하게 된다.

3.2 종래의 PACD와 Inverted PACD의 손실비교

Figure 4는 종래의 PACD와 Inverted PACD의 손실을 비교한 그래프이다. 그림에서 보이는 바와 같이 Inverted PACD는 종래의 PACD와 비교하여 1~10GHz 사이에서 1dB 가량의 손실 감소 효과를 보인다. 따라서 제안하는 Inverted PACD 구조가 기존의 PACD 구조에서의 손실성분들을 감소시키며 Inverted 구조를 사용할 때 주기적인 특성을 보이면서도 손실이 적은 소자를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

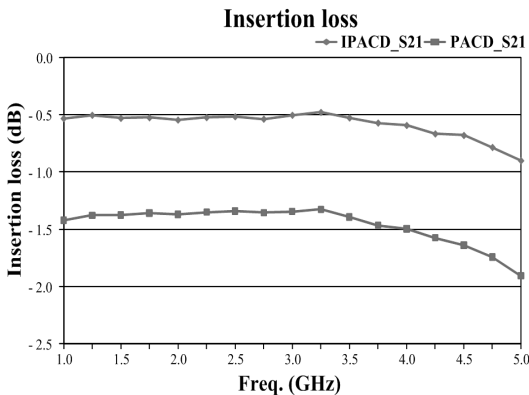


Figure 4: Insertion loss comparison of microstrip line employing PACD and Inverted PACD structure

실지 선로의 파장이 감소하면 선로의 길이도 축

소되므로, 공정한 비교를 위해서는 동일한 파장을 가지는 전송선로에 대해서 손실특성을 비교해야 한다. 따라서 다음의 Table 1에 $\lambda/4$ 의 길이를 가지는 전송선로에 대해 손실특성을 비교하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안한 Inverted PACD 선로구조는 종래의 PACD 선로구조보다 저손실 특성을 보이며, 종래의 마이크로스트립 선로에 필적할만한 손실특성을 보인다.

Table 1: Insertion loss of transmission lines with a length of $\lambda/4$

	3GHz	4GHz	5GHz	6GHz	7GHz
Conventional microstrip line	0.8 dB	0.70dB	0.65dB	0.62dB	0.61dB
Conventional PACD	1.17 dB	1.08 dB	1.14 dB	1.21 dB	1.32 dB
Inverted PACD	0.47 dB	0.41 dB	0.52 dB	0.73 dB	1.10 dB

3.3 종래의 Microstrip 선로와 Inverted PACD의 선로 파장 비교

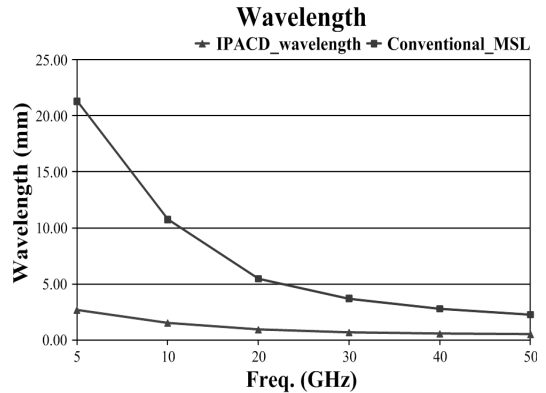


Figure 5: Wavelength comparison of Conventional Microstrip line and microstrip line employing Inverted PACD structure

Figure 5는 본 논문에서 제안한 Inverted PACD 선로와 종래의 Microstrip 선로의 선로 파장을 비교한 그래프이다. Inverted PACD 구조의 선로 파장은 종래의 마이크로스트립 선로의 11.85%로 축소됨을 볼 수 있다. 예를 들어, 주파수 5GHz에서 종래의 마이크로스트립 선로의 경우, 선로 파장은 21.12mm이

며 Inverted PACD 구조의 경우, $l_c=20\mu m$ 일 때의 선로 파장 λ 는 2.504mm이다. 상기 내용으로부터 본 논문에서 제안하는 Inverted PACD 선로구조는 MMIC 상의 초소형 수동소자로써 응용 가능성을 알 수 있다.

3.4 Inverted PACD 구조를 이용한 임피던스 변환기 특성

본 논문에서 제안한 Inverted PACD 구조를 이용하여 중심주파수 4-5 GHz에서 사용할 수 있는 임피던스 변환기를 설계하였다. Figure 6는 GaAs 기판상에서 실제 제작한 임피던스 변환기의 사진이다. GSG 패드는 온-웨이퍼 측정을 위하여 설계되었으며 임피던스 변환기 부분은 점선으로 표시하였다. 설계한 임피던스 변환기의 특성 임피던스 Z_0 는 $Z_0=(Z_{c1} \cdot Z_{c2})^{0.5}$ 의 식으로부터 주어지며 Z_{c1} 과 Z_{c2} 는 각각 Figure 6에서 나타낸 소스와 로드 임피던스이다. 상기 임피던스 변환기의 Z_{c1} 과 Z_{c2} 는 4 옴과 9 옴이며 Z_0 는 6 옴이다. Z_0 가 6 옴일 때 l_c 는 20 μm 이다. 중심 주파수 4.9GHz에서 $\lambda/4$ 임피던스 변환기의 길이는 Figure 6에 나타낸 바와 같이 0.6mm이고 폭은 20 μm 이다.

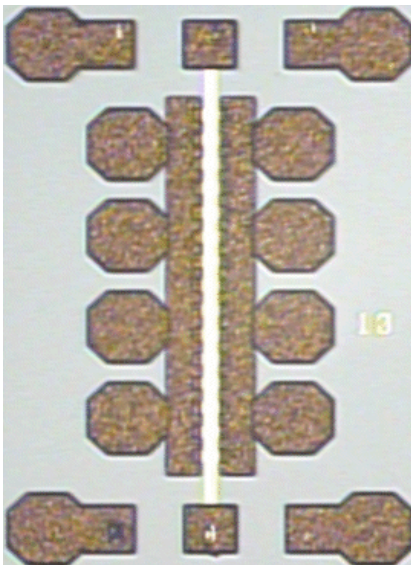


Figure 6: Wavelength comparison of Conventional Microstrip line and microstrip line employing Inverted PACD structure

Table 2: Size of the impedance transformer employing Inverted PACD structure and conventional one

	W	$\lambda/4$	SIZE
Conventional microstrip line	0.15mm	4.7mm	0.705mm ²
Inverted PACD microstrip line	0.02mm	0.6mm	0.012mm ²

Table 2는 Inverted PACD 구조의 임피던스 변환기와 기존의 임피던스 변환기의 크기를 비교한 것이다. Inverted PACD 구조의 임피던스 변환기의 크기는 Table 1에 나타낸 바와 같이 0.012mm²이며, 종래의 임피던스 변환기 크기의 1.7%의 면적을 차지한다. 즉, 종래의 GaAs 기판 상에 마이크로 스트립 선로 구조를 이용하여 임피던스 변환기를 제작하였을 때 Z_0 가 6 옴일 때의 $\lambda/4$ 변환기의 폭은 0.15mm이고 그 길이는 4.7mm이며 이 경우 종래의 임피던스 변환기의 총면적은 0.705mm²이다.

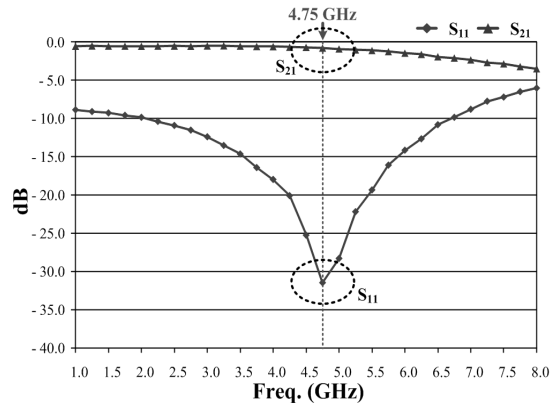


Figure 7: Wavelength comparison of Conventional Microstrip line and microstrip line employing Inverted PACD structure

Figure 7은 제작한 임피던스 변환기의 반사손실 S_{11} 과 삽입손실 S_{21} 을 나타낸 그림이다. 반사손실과 삽입손실은 포트 임피던스 50 Ω 에서 측정되었고 소스, 로드 임피던스 Z_{c1} , Z_{c2} 에 의해 정규화 되었다. 제안된 임피던스 변환기는 Figure 7에서 관찰할 수

있는 바와 같이 중심 주파수 4.75GHz에서 -31.47dB의 반사손실과 -0.78dB의 삽입손실을 보인다. 그리고 2.25~6.5GHz 대역에서 -10dB 이하 반사손실과 -1dB이하의 삽입손실 특성을 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 PACD 선로구조가 가지는 고손실 특성의 문제점을 개선하기 위하여, Inverted PACD 구조를 제안하였다. Inverted PACD 선로구조의 손실특성은 종래의 PACD 구조보다 훨씬 개선되었으며, 종래의 전송선로와 필적할만한 손실특성을 보여주었다. 구체적으로 $\lambda/4$ 의 길이를 가지는 Inverted PACD 선로구조의 손실특성은 4GHz에서 0.41dB이다. 상기 Inverted PACD 선로구조는 종래의 마이크로스트립 선로와 비교하면 단파장 특성을 보여주었으며, 구체적으로 주파수 5GHz에서 종래의 마이크로스트립 선로의 선로 파장은 21.12mm이며 Inverted PACD 선로구조의 선로 파장은 2.504mm이다. 또한, MMIC 용 초소형 수동 소자로서의 응용 가능성을 제시하기 위하여, Inverted PACD 선로구조를 이용하여 GaAs MMIC 상에 임피던스 변환기를 제작 및 측정하였다. 그 결과 Inverted PACD 선로구조를 이용하여 제작한 임피던스 변환기의 크기는 0.012 mm^2 이며, 종래의 임피던스 변환기 크기의 1.7%의 면적을 차지하였다. 상기 임피던스 변환기는 2.25~6.5GHz 대역에서 -10dB 이하 반사손실과 -1dB 이하의 삽입손실 등 양호한 RF 특성을 보여주었다. 상기 결과로부터 본 논문에서 제안하는 Inverted PACD 구조는 MMIC상의 초소형 수동소자 개발에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2010년 교육과학기술부로부터 지원받아 수행된 연구임 (지역거점연구단육성사업/차세대 물류IT기술연구사업단). 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2010-0007452). 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 지역산업기술

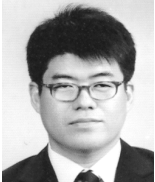
개발사업으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- [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] Y. Yun, J. W. Jung, K. M. Kim, H. C. Kim, W. J. Chang, H. G. Ji, and H. K. Ahn "Experimental study on isolation characteristics between adjacent microstrip lines employing periodically perforated ground metal for application to highly integrated GaAs MMICs", *IEEE Micro. Wireless Compon. Lett*, vol. 17, no. 10, pp. 703-705, October, 2007.
- [5] Y. Yun, K. S. Lee, C. R. Kim, K. M. Kim, and J. W. 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 Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, no. 10, pp. 3805-3817, October, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] J. Gao, and L. Zhu, "Per-unit-length parameters of 1-D CPW metamaterials with simultaneously series-C and shunt-L loading", in Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conf., Suzhou, China, Dec. 2005, pp. 39-42.
- [9] 정장현, 강석엽, 윤영, "MMIC 상에서 주기적으로 배치된 용량성 소자를 이용한 단파장 전송선로", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권 제6호, p. 840-845, 2010.
- [10] D. M. Pozar, Microwave Engineering. Reading, MA : Addison-Wesley, 1990.

저 자 소 개



윤영(尹榮)

1993년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사), 1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사), 1999년 3월: 일본 오사카 대학교 전기공학과 (공학박사), 1999년 4월~2003년 9월: 마쯔시 따전기 반도체 디바이스 연구센터

MMIC/RFIC 연구그룹, 2003년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 부교수

[주 관심분야] 무선통신용 MMIC/RFIC 등