

Lange 커플러를 이용한 MMIC 위상변위기 특성

The Characteristics of MMIC Phase Shifter with Lange Coupler

정 명 득 · 박 동 철*

Myung-Deuk Jeong · Dong-Chul Park*

요 약

광대역에서 동작되는 간단한 180° MMIC 위상변위기를 제안하였다. 제안된 회로는 1개의 Lange 커플러와 2개의 PIN 다이오드만으로 구성되어 있다. 2~6 GHz 대역에서 측정된 위상변위기는 최대 위상오차가 13°이며 3.2 dB의 최대 삽입손실과 6.3 dB의 최소 반사손실을 보였다.

Abstract

This paper proposed a simple 180° MMIC phase shifter for wideband application. The phase shifter simply consists of a Lange coupler and two GaAs PIN diodes. The measured performance of the phase shifter in the 2 to 6 GHz band shows a maximum phase error of less than 13°, maximum 3.2 dB insertion loss, and minimum 6.3 dB return loss.

Key words : 180°, Wideband, MMIC, Phase Shifter, Reflection Type

I. 서 론

최근 전자적으로 빔(beam)을 조향(steering)할 목적으로 능동 위상배열 안테나 시스템(active phased-array antenna system)이 널리 연구되고 있는 추세이다^[1]. 이런 배열시스템에 사용되는 송·수신 부품들은 그 부품들 간의 특성편차가 작아야 하고 가볍고 소형이면서 높은 신뢰도가 요구된다. MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits) 기술은 이런 요구조건을 만족할 수도 있을 것이다^[2].

반도체 위상변위기는 여러 가지 구조가 있으나^[3], 그 중에서 광대역 동작을 위해서는 고역/저역통과필터 구조와 반사 구조가 널리 사용되어져왔다. 고역/저역통과필터 구조는 전체 회로의 크기가 작아지는 장점이 있으나, 필터를 구성하는 집중 소자의 값에 따라서 필터 특성이 변화하기 때문에 위상특

성이 공정에 매우 민감하다는 단점이 있다^{[4],[5]}. 반면에 반사 구조는 커플러의 광대역 특성을 이용하는 구조로서, 커플러를 사용해야 하는 구조적 제약 때문에 회로의 크기가 매우 커진다는 단점이 있으나, 회로의 입·출력 손실 특성이 우수하고 위상오차가 비교적 작으며, 공정의 변화에 민감하지 않다는 장점이 있다^{[6],[7]}.

반사구조는 커플러와 함께 스위칭 소자와 반사부하로 구성되며 광대역 응용은 주로 Lange 커플러가 사용된다. Lange 커플러는 even 모드와 odd 모드의 위상속도에 대해서 서로 보상해 주는 경향이 있어 한 옥타브 이상의 대역폭을 가지며, 쉽게 3 dB 이상의 결합율을 달성할 수 있는 장점이 있다^{[8],[9]}. 그러나 Lange 커플러는 선폭 및 간격이 좁기 때문에 제작하기가 힘들 뿐 아니라 선로 사이의 결합선 제작이 어려운 단점이 있어서 MMIC 기술을 이용하는

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20020812-096

· 수정완료일자 : 2002년 11월 8일

경우가 있다⁹⁾.

위상배열시스템에서 모노 펄스 기법은 방향을 추적하기 위해 합(Σ)·차(Δ) 패턴을 이용한다. 도파관을 이용한 위상배열시스템은 Magic-T를 이용하여 180° 위상차이를 얻어 합·차 패턴을 구현하지만, planar type의 solid-state 위상배열시스템은 180° 하이브리드 커플러나 위상변위기를 사용하여 180° 위상을 얻는다. 본 180° 위상변위기는 전자전 시스템에서 방향을 탐지하기 위한 차 패턴을 생성할 목적으로 사용될 수 있으며, 위상변위기에서 최상위 비트인 180° -비트를 구현할 때 사용할 수도 있다.

위상변위기에서 위상변이 제어소자로 사용되는 GaAs 기반의 소자는 PIN 다이오드와 FET가 널리 사용된다¹⁰⁾. 그 중에서 PIN 다이오드는 “on” 상태에서 낮은 저항을 갖고 “off” 상태에서 낮은 기생 정전 용량을 갖기 때문에 다른 소자에 비해 상당히 우수한 스위칭 특성을 가진다는 점이다.

본 논문에서는 PIN 다이오드와 Lange 커플러만으로 구성된 광대역 180° 위상변위기를 제안하였다. 국내기술로 개발된 GaAs PIN 다이오드와 함께 MMIC로 회로를 설계하고 제작하였다.

II. 본 론

2-1 PIN 다이오드

본 절은 국내에서 개발한 PIN 다이오드의 DC 및 RF 특성에 관하여 간략하게 언급하였다.

2-1-1 DC 특성

수직 에피층 PIN 다이오드 구조는 평면형 구조보다 더 낮은 기생성분과 더 뛰어난 고품질의 진성영역 성능을 가지게 되므로 초고주파대역에서 우수한 전기적 성능을 갖는다.

제작된 GaAs PIN 다이오드의 순방향 turn on 전압은 1.3 V이다. 항복 전압은 -65 V였다.

2-1-2 PIN 다이오드 모델 및 RF 특성

그림 1은 주파수 2~6 GHz 범위에서 제어소자로 동작하는 PIN 다이오드의 등가회로이다. 다이오드

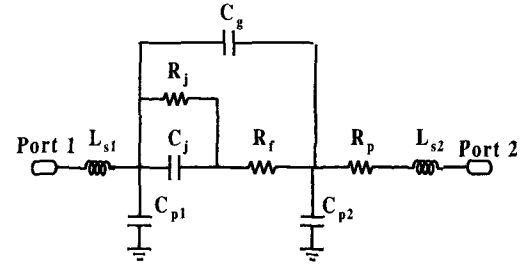


그림 1. PIN 다이오드 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of PIN diode.

표 1. PIN 다이오드의 모델 파라미터
Table 1. The model parameters of PIN diode.

Parameters	R_j	R_f	R_p	C_j	C_g	C_{p1}	C_{p2}	L_{s1}	L_{s2}
순방향 전류 @10 mA	1.81	0.09	0.17	0.06	0.54	0.03	0.03	0.06	0.06
역방향 전압 @-12 V	2.3e6	2.3e6	1.3	0.03	0.03	0.02	0.04	0.07	0.05

가 순방향 바이어스 일 때, R_p 는 다이오드 단자와 관계된 기생저항 성분이며 R_j 는 PIN 다이오드의 P-I 계면에서의 접합 저항을 말한다. DC와 저주파에서 R_j 는 PIN 다이오드에서 주가 되는 저항이다. 등가회로의 직렬저항 R_f 는 PIN 다이오드의 I 영역에서의 반송자 재결합으로부터 기인한다. 주파수가 높아질수록 접합용량(C_j)이 단락되므로 직렬저항(R_f)이 접합 저항(R_j)보다 더 중요해진다. 다이오드가 역방향 바이어스일 때, R_j 와 R_f 는 거의 개방 상태가 되며 결과적으로 다이오드의 가장 주가 되는 요소는 극간 용량(C_g)과 직렬저항 R_p 가 된다. 표 1은 PIN 다이오드의 모델 파라미터들이다.

그림 2는 구동전류가 10 mA일 때 제작된 PIN 다이오드의 삽입손실로서 PIN 다이오드 6개를 측정된 결과이다. 그림은 1~7 GHz 범위에서 약 0.3 dB 정도의 손실을 보이고 있다. 순방향 바이어스시 전류가 증가함에 따라 저항값이 선형적으로 감소하였으며 반사손실은 -30 dB보다 작게 측정되었다.

그림 3은 제작된 vertical GaAs PIN 다이오드의 사진으로써 가로×세로의 길이는 $30\text{ }\mu\text{m} \times 30\text{ }\mu\text{m}$ 정도이다. PIN 다이오드의 에피는 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 의 p+ 층,

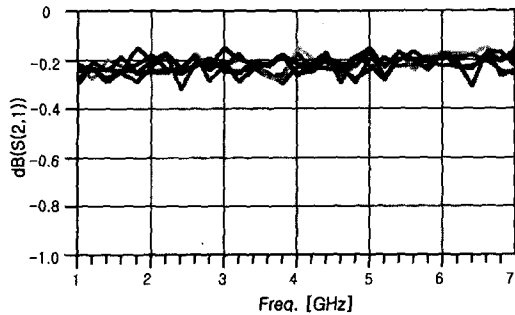


그림 2. PIN 다이오드의 삽입손실
Fig. 2. PIN diode insertion loss.

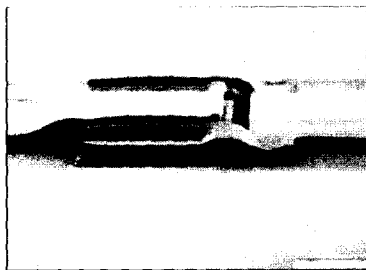


그림 3. PIN 다이오드의 전자현미경 사진
Fig. 3. SEM photograph of PIN diode.

2.5 um의 진성영역과 1.5 um의 n+ 층으로 구성되어 있다. PIN 영역의 단차가 4.5 um로 비교적 커서 화학적 식각(etching)으로 메사를 형성하는 것이 까다로운 공정이었다.

2-2 위상변위기

커플러를 이용한 반사구조 위상변위기는 오래 전부터 사용되어온 잘 알려진 회로이다. 반사구조 위상변위기의 동작원리는 리액티브 부하(reactive load)로 작용하는 커패시터 값 사이의 상대적인 비(ratio)에 따라서 위상 차이가 생기는 것이다. 따라서 위상변이가 비교적 큰 180°는 이들 두 커패시터의 상대적인 비가 너무 커서 광대역에서 반사부하로 작용하지 못하게 되므로 적용하기 어렵다. 이런 이유로 참고문헌 [7]에서는 그림 4의 구조처럼 2개의 SPDT(single pole double throw) 스위치, shorted Lange 커플러 회로와 π -형 회로로 구성된 복잡한 회로를 사용하여 광대역 특성을 구현하였다. 이 회

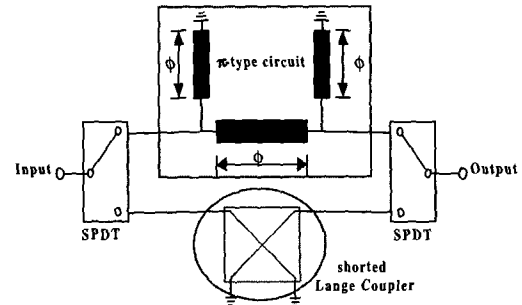


그림 4. 기 사용된 180° 위상변위기
Fig. 4. Previous version of 180° phase shifter.

로는 SPDT 스위치가 선택하는 경로에 따라 180°의 위상차이가 발생하도록 한 것이다.

2-2-1 회로설계

본 논문에서 제안한 회로는 그림 5처럼 1개의 Lange 커플러와 2개의 GaAs PIN 다이오드만으로 구성된 회로이다. 그림 4와 비교해 볼 때 π -형 회로와 2개의 SPDT 스위치 대신 PIN 다이오드 2개만이 사용된 간단한 회로이다. 3:1의 광대역을 수용하기 위해 $\lambda/4$ Lange 커플러를 선택하였으며 국내 개발한 GaAs PIN 다이오드를 사용하여 MMIC로 설계하였다. 바이어스 회로는 칩 내부에 포함시켰으며 DC 바이어스는 5 V와 -12 V를 사용하였다. PIN 다이오드의 소모전력은 5 V일 때 10 mA가 흐르므로 50 mW이고 동시에 다이오드 2개가 도통되므로 100 mW가 되는 셈이다. 그리고 RF 접지는 via hole로 구현하였다.

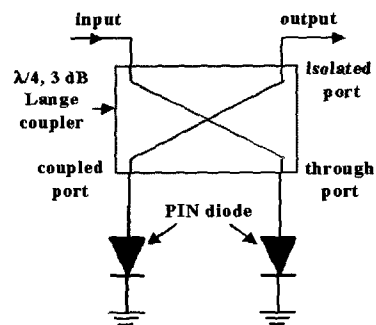


그림 5. 제안된 180° 위상변위기
Fig. 5. Proposed 180° phase shifter.

2-2-2 동작원리

주어진 동작점에서 PIN 다이오드가 "on" 되면 $R_{on}=1.8 \Omega$ 으로 보여 반사계수가 거의 -1인 단락 ($\Gamma \approx -1$)으로 작용하고, "off" 되면 $C_{off}=60 \text{ fF}$ 으로 보여 반사계수가 거의 1인 개방 ($\Gamma \approx 1$)으로 작용하여 신호가 모두 반사하게 된다. 따라서, 두 개의 PIN 다이오드가 동시에 "on" 또는 "off" 될 때 발생하는 위상차이는 이론적으로 180° 차이가 나게 된다.

그림 6에서 입력의 RF 신호를 $V_o e^{(j\omega t+0)}$ 라 하면 coupled port(V_c)와 through port(V_t)의 신호는 각각 $V_c = V_o e^{(j\omega t+0)}$, $V_t = V_o e^{(j\omega t+\pi/2)}$ 로 표시되며 다이오드에 의해서 반사되는 신호(V_r)는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} (V_r)_{off} &= (1/\sqrt{2}) V_o e^{(j\omega t+0)} + (1/\sqrt{2}) V_o e^{(j\omega t+\pi/2)} \\ (V_r)_{on} &= (1/\sqrt{2}) V_o e^{(j\omega t-\pi)} + (1/\sqrt{2}) V_o e^{(j\omega t-\pi/2)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, "off"는 두 개의 PIN 다이오드가 동시에 개방된 경우이고 "on"은 동시에 단락된 상태로 가정하였다. 이때 최종 출력신호(V_{out})는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} (V_{out})_{off} &= (1/2) V_o e^{(j\omega t+\pi/2)} + (1/2) V_o e^{(j\omega t+\pi/2)} \\ &= V_o e^{(j\omega t+\pi/2)} \\ (V_{out})_{on} &= (1/2) V_o e^{(j\omega t-\pi/2)} + (1/2) V_o e^{(j\omega t-\pi/2)} \\ &= V_o e^{(j\omega t-\pi/2)} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 두 신호의 위상차이가 180° 임을 알 수 있다. 이에 대한 위상 관계식을 그림 6에 도식적

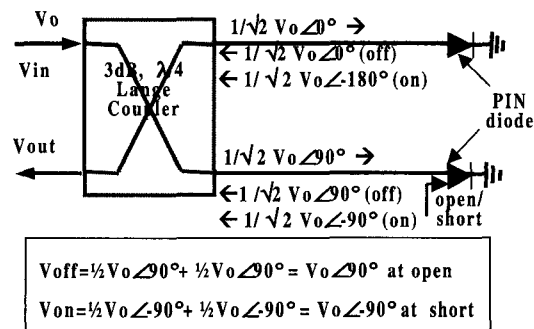


그림 6. 180° 위상 차이에 대한 도식적인 표현
Fig. 6. Graphical representation for 180° phase difference.

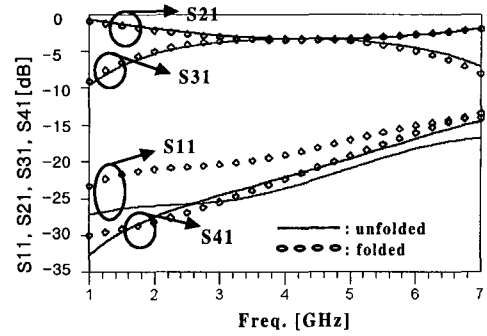


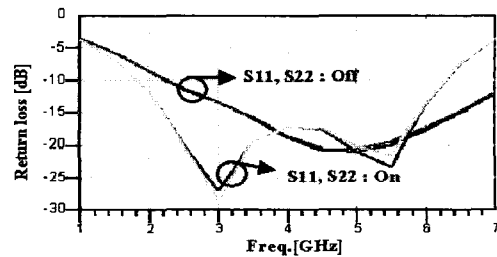
그림 7. Folded Lange 커플러의 시뮬레이션 특성
Fig. 7. Simulation results of folded Lange coupler.

으로 표현하였다. 여기서, 다이오드는 이상적인 것으로 가정하였다.

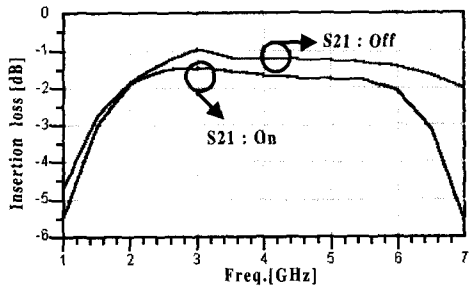
2-2-3 시뮬레이션 및 제작

$1/4$ 파장 Lange 커플러는 중심주파수 4 GHz에서 그 길이가 약 6400 μm 정도로 길기 때문에 칩 크기를 줄이기 위하여 접어서 사용하였다. Unfolded Lange 커플러와 전기적 특성이 유사한 folded Lange 커플러를 해석하여 설계하고 제작하였다. 그림 7은 ADS에서 제공되는 Momentum을 이용하여 folded Lange 커플러와 기존의 unfolded Lange 커플러에 대한 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 그림에서 S_{21} 과 S_{31} 은 coupled port와 through port의 전달특성이고 S_{41} 은 isolated port의 전달특성이다. 두 경우의 특성이 거의 일치함을 알 수 있다. 설계된 Lange 커플러는 W10S8(선폭 10 μm , 간격 8 μm)이다.

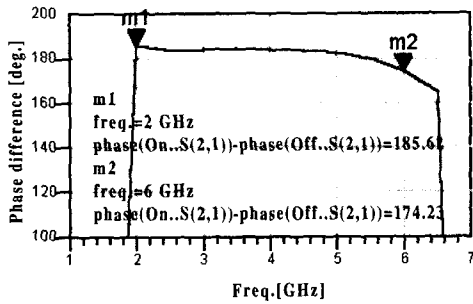
그림 8은 시뮬레이션 결과로서 2~6 GHz 대역에서 최소 반사손실은 7.6 dB, 최대 삽입손실은 2.1 dB이나 위상오차는 $\pm 6^\circ$ 를 초과하지 않음을 알 수



(a) Input and output return losses.



(b) Insertion loss.



(c) Phase shift.

그림 8. 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulation results.

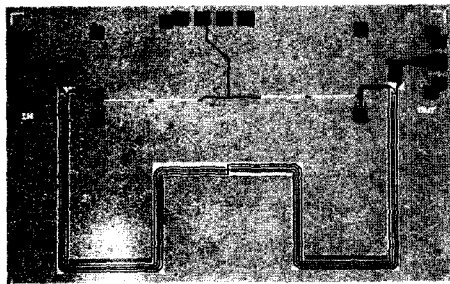


그림 9. 180° 위상변위기 제작 사진
Fig. 9. Photograph of the fabricated 180° phase shifter.

있다.

그림 9는 제작된 회로 사진이며, 그림에서 보듯이 Lange 커플러가 대부분의 면적을 차지함을 알 수 있으며, 선로 사이의 결합선은 air-bridge 공정을 이용하였으며, 칩 크기는 2.8 mm × 1.8 mm이다.

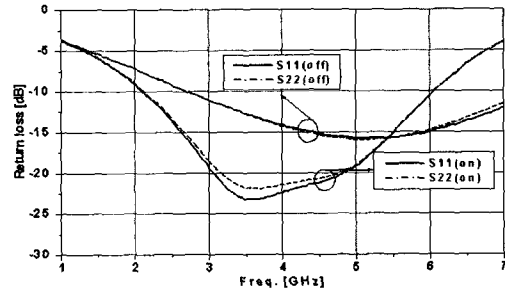
III. 측정결과 및 고찰

제작된 180° 위상변위기에 대한 성능 측정결과를

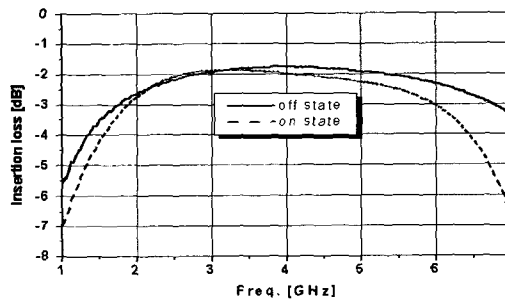
표 2. 삽입손실 비교

Table 2. Comparison of insertion loss.

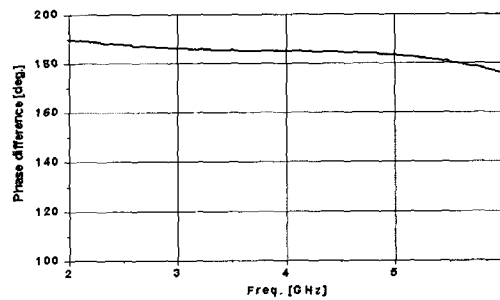
주파수 [GHz]	2	4	6	
시뮬레이션 [dB]	off	1.8	1.2	1.4
	on	1.8	1.6	2.1
측정 [dB]	off	2.6	1.7	2.3
	on	3.0	2.2	3.2



(a) Input and output return losses.



(b) Insertion loss.



(c) Phase shift.

그림 10. 측정결과
Fig. 10. Measurement results.

그림 10에 나타내었다.

그림 (a)에서 보듯이 반사손실은 6.3 dB로 측정되어 시뮬레이션 결과보다 1.3 dB 정도 떨어졌다.

삽입손실은 시뮬레이션 결과와 측정결과가 비슷

한 경향을 보이고 있으며 측정치가 시뮬레이션보다 최대 1.1 dB 컷다. PIN 다이오드가 "on" 되었을 경우가 "off" 되었을 경우보다 삽입손실이 크게 측정되었으며 그것은 다이오드 손실과 via hole 손실이 추가되었기 때문으로 판단된다. PIN 다이오드와 via hole 손실을 제외한 대부분의 손실은 Lange 커플러에 의한 손실로 생각된다. 표 2는 삽입손실의 시뮬레이션과 측정결과를 간략하게 비교한 것이다.

위상변이 특성은 2 GHz에서 193°, 6 GHz에서 181° 이므로 최대 위상 오차는 +13°로 측정되었으며, 특히 주어진 대역 내에서 선형적으로 단조 감소하는 특성을 보인다.

그림 11은 Lange 커플러의 전면과 단면을 찍은 SEM 사진으로, 그림 (a)에서 선폭은 설계치와 비슷하나 그림 (b)에서 간격은 평균 9 um로 설계치보다 1 um 증가하였음을 알 수 있다.

그림 12는 두 전송선 사이의 간격 변화에 따른 커플링 영향을 보기 위해 W10S8과 W10S9 구조에 대하여 EM-simulation 결과를 비교한 것으로, 간격이 1 um 정도 증가하면 전체적으로 느슨한 커플링이 될

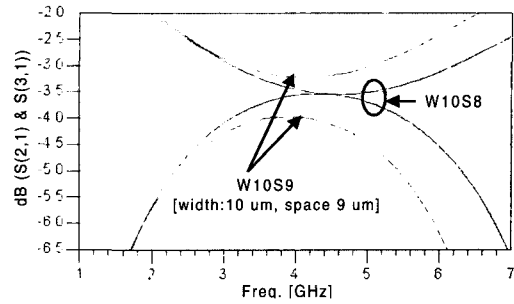


그림 12. 커플링 효과

Fig. 12. Coupling effect.

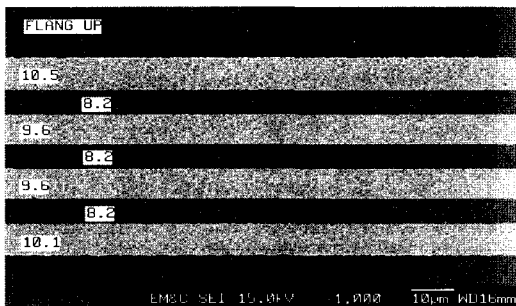
뿐만 아니라 주파수가 증가할수록 커플링이 급격히 떨어지는 현상을 볼 수 있다. 따라서, 높은 주파수에서 손실을 줄이기 위하여 커플러의 선로 간격을 예상보다 좁게 설계하는 것이 유리할 것 같다. 그림에서 S_{21} 은 coupled port, S_{31} 은 through port의 전달 특성이다.

IV. 결 론

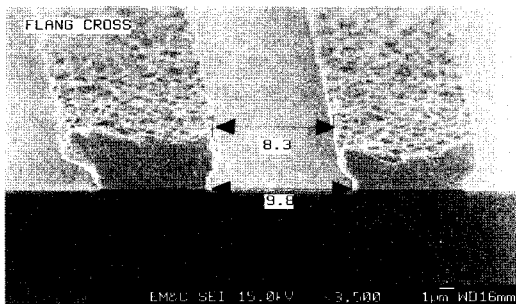
본 논문은 2~6 GHz 대역에서 동작하는 단순구조의 180° MMIC 위상변위기를 설계 및 제작하였다. 제작된 180° 위상변위기의 최대 삽입손실은 3.2 dB이지만, 그 구조가 간단하며 위상오차가 최대 13° 이내이므로 비교적 정확한 위상제어가 가능함을 알 수 있었다. 본 회로는 광대역에서 합·차 빔 패턴을 생성하여 방향을 추적하는 전자전 시스템에 적용할 수 있고 위상변위기에서 180°-비트만을 대체하여 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. Zuefle, F. Steinhagen, W. H. Haydl and A. Hulsmann, "Coplanar 4-Bit HEMT Phase Shifters for 94 GHz Phased Array Radar Systems", *IEEE MTT-S*, pp. 303-306, 1999.
- [2] E. Rogeaux, V. Grognet, J. L. Cazaux, F. Coppel, M. Geen and G. Gatti, "Standard MMICs for space application : A broadband high resolution phase shifter", *24th European Microwave Conference*, pp. 1483-1488, 1994.



(a) Top view



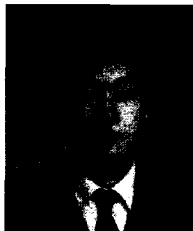
(b) Cross sectional view

그림 11. Lange 커플러의 전자현미경 사진

Fig. 11. SEM photograph of Lange coupler.

- [3] Robert V. Garver, "Broad-Band Diode Phase Shifters", *IEEE MTT*, pp. 314-323, May, 1972.
- [4] M. J. Schindler, M. E. Miller, "A 3 Bit K/Ka Band MMIC Phase Shifter", *IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symposium*, pp. 95-98, 1988.
- [5] M. E. Goldfarb, PE Raytheon Company, "A Novel Design for a MMIC 180 Degree Phase Shifter", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 175-177, 1992.
- [6] D. C. Boire, G. St. Onge, C. Barratt, G. B. Norris and A. Moysenko, "4:1 Bandwidth Digital Five Bit MMIC Phase Shifters", *IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symposium*, pp. 69-73, 1989.
- [7] D. C. Boire, R. Marion, "A High Performance 6-18 GHz Five Bit MMIC Phase Shifter", *IEEE GaAs IC Symposium Digest*, pp. 267-270, 1995.
- [8] Dai Yongsheng, Chen Tangshen, et al., "A Novel Multi-Octave 90° Digital/Analog Compatible MMIC Phase Shifter", *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings*, pp. 72-75, 2000.
- [9] Kenichi Miyaguchi, Morishige Heida and Kazuhiko Nakahara, et al., "An Ultra-Broad-Band Reflection-Type Phase-Shifter MMIC with Series and Parallel LC Circuit", *IEEE MTT*, pp. 2446-2452, Dec. 2001.
- [10] A. Opinath, "Comparison of GaAs MESFET and GaAs p-i-n diodes as switch elements", *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-6, no. 10, Oct. 1985.

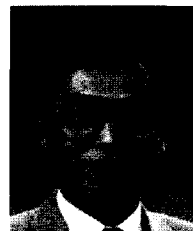
정 명 득



1989년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 1998년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 능동 위상 배열 시스템

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)
 1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson
 1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chairperson
 2000년~2001년: 한국전자과학회 회장
 1976년~현재: 충남대학교 공과대학 전자공학과 교수
 2002년 5월~현재: 충남대학교 산업기술연구소장
 [주 관심분야] Microwave and millimeter-wave, passive devices, EMC/EMI topics and antenna