

공기 절연 적층형 마이크로스트립 구조의 새로운 3 dB 커플러 MMIC

A Novel Air-Gap Stacked Microstrip 3 dB Coupler for MMIC

류기현 · 김대현 · 이재학 · 서광석

Gi-Hyon Ryu · Dae-Hyun Kim · Jae-Hak Lee · Kwang-Seok Seo

요 약

본 논문에서는 공기 절연 적층형 마이크로스트립 구조의 새로운 MMIC 3 dB 커플러를 제안하였다. 제안된 커플러의 제작은 아주 간단하며, 유전체 공정을 필요로 하지 않는다. 제안된 커플러의 구조 해석을 위해서 HP-Momentum을 이용하였으며, 이를 통해 제안된 커플러의 구조를 최적화 하였다. 제작된 커플러는 22 GHz 대역폭(23 GHz~45 GHz)을 갖고 있었다. 또한, 제안된 커플러를 이용하여 Ka-Band용 평형 2단 전력 증폭기를 성공적으로 제작하였다.

Abstract

This paper presents a very simple coupled line structure for MMIC which uses stacked microstrip line and does not employ any dielectric process step. For the analysis and optimization of these coupled line structure, HP-Momentum was used. The measured performance of 3 dB coupler shows 23 to 45 GHz broadband characteristics. Additionally, a balanced 2-stage Ka-Band power amplifier which uses the proposed 3 dB coupler, was also fabricated.

I. 서 론

마이크로스트립 구조의 90도 방향성 커플러는 마이크로파 및 밀리미터파 대역의 회로들에 많이 이용되고 있다. 응용 예로써는 위상 변환기(phase shifter), 평형 증폭기(balanced amplifier), 평형 혼합기(balanced mixer), 벨런(balun) 등의 회로들이 있다. 이와 같은 회로에서 사용되어지는 커플러는 3 dB 커플러이다. 3 dB 커플러를 만들기 위해서는 커플링을 강하게 시켜야 하며, 이는 마이크로스트립 전송선을

아주 가깝게 위치시키는 것으로는 부족하며, Lange 커플러처럼 여러 개의 마이크로스트립 전송선이 상호 커플링된 구조를 사용한다^[1]. 그러나, 주파수 대역이 높아지면, 전자기파의 방사손실(radiation loss)을 줄이기 위해서, 기판의 두께를 얇게 만들어야 하며, 기판의 두께가 얇으면, 50 Ω 전송선을 구현할 때, 폭도 함께 작아지게 된다. 한편, 기판이 얇아졌을 때에도 두꺼운 때와 같은 정도의 커플링을 얻기 위해서는 커플링된 전송선 사이의 간격도 상대적으로 더 좁아져야 한다. 예를 들어, 유전율이 12.9이고 두께가 75 μm인 GaAs 기판 위에 Lange 커플러를

서울대학교 전기공학부(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

· 논문 번호 : 990826-05S

· 수정완료일자 : 1999년 9월 13일

만들기 위해서는 도선의 폭이 $7\ \mu\text{m}$, 도선 사이의 간격은 $4\ \mu\text{m}$ 정도일 때 3dB 커플링이 얻어진다. 이는 두꺼운 Au Metal을 사용하는 MMIC 공정으로 얻을 수 있는 도선-도선 사이 간격의 한계에 해당한다. 그러므로 만들기도 어려울 뿐 아니라, 재연성의 문제가 있다. 그래서 공정상에 한계를 벗어나지 않는 범위 내에서 좀더 강한 커플링을 얻기 위한 연구로 넓은 면으로 커플링된 구조(broadside-coupled structure)^[2]나, semireentrant section 구조^[3]와 같은 방법들이 제안되었다. 그러나, 이러한 구조들은 표준 MMIC 공정단계와는 별도로 polyimide와 같은 유전체 층을 만들기 위한 공정 단계가 필요한 단점이 있다. 그 외에도 표준 MMIC 공정을 그대로 이용하는 embedded microstrip 커플러 구조^[4]가 제안되었다. 여기서는 강한 커플링을 얻기 위하여 MIM 커패시터의 유전체 막으로 사용되는 $0.2\ \mu\text{m}$ SiN 막을 이용하였다. 이러한 구조에서, 원하는 정도의 정확한 커플링을 얻기 위해서는 SiN를 사이에 둔 위쪽과 아래쪽 금속판이 overlap되는 폭을 정확하게 조절해야 하지만, 이는 공정상에 흔히 있는 misalign 정도에 따라서 심각하게 특성이 바뀌게 된다. 더구나, 일부 밀리미터파 회로 응용에서는 FET와 같은 능동 소자의 passivation 공정과 MIM 커패시터의 막을 형성하는 공정을 동시에 할 수 있도록 SiN 막의 두께를 $0.1\ \mu\text{m}$ 이하로 하는 경우도 있다. 이러한 공정에서 embedded microstrip 커플러를 재현성 있게 구현하는 것은 거의 불가능하리라 사료된다.

본 논문에서는 강한 커플링을 얻기 위해서 공기 절연 적층형 마이크로스트립 구조를 제안하였다. 이 구조는 표준 MMIC 공정단계 중에 air-bridge 공정을 그대로 이용하기 때문에 별도의 공정이 필요하지 않고, 공기 절연 방식이므로 유전체도 필요하지 않다. 특히, 위쪽과 아래쪽의 금속판이 완전하게 겹쳐지는 구조이기 때문에 misalign이 되어도 커플링이 거의 변하지 않는다. 본 논문의 구성은 먼저, 제안된 구조의 field simulation을 통한 최적화 결과를 보였으며, 최적화된 커플러의 제작과정 및 측정결과를

보였다. 또한, 제안된 커플러를 평형 2단 전력 증폭기(balanced 2-stage power amplifier)에 적용하여, 본 구조가 기존의 MMIC 공정을 그대로 이용하여 제작 가능함을 보였다.

II. 설 계

그림 1에서 제안된 공기 절연 적층형 커플러의 구조 단면도를 보였다. 제안된 커플러의 설계변수는 위쪽 금속판의 폭(W1)과 아래쪽 금속판의 폭(W2), 그리고 두 금속판 사이의 간격(gap)이 있다. 두 금속판의 간격은 표준 air-bridge 공정의 조건에 의해서 결정되어지므로, 본 연구에서는 두 금속판의 폭을 설계 변수로 하였다. 제안된 커플러는 두 금속판이 비대칭적으로 커플링되기 때문에 이러한 구조의 analytic한 해는 구할 수가 없다. 그래서 이러한 구조의 해석은 주로 상용 field simulator에 의존하게 되는데, 본 연구에서는 HP-Momentum을 이용하였다. 구조 해석 시에 사용된 최적화 조건은 matching과 isolation은 $-15\ \text{dB}$ 이하로 유지하고, 커플링은 $-3\ \text{dB}$ 이상, through 은 $-5\ \text{dB}$ 이상으로 정하였다. 두 금속판의 폭을 변화시켜가면서 field simulation을 수행하였다. 아래쪽 금속판의 폭이 10, 20, $40\ \mu\text{m}$ 로 변화시켰고, 여기에 따라서 위쪽 금속판의 폭의 아래쪽 금속판의 폭에 대한 비율(Ratio= $W2/W1$)이 1에서 2사이로 변화시켰다. 그림 2에서는 두 금속판

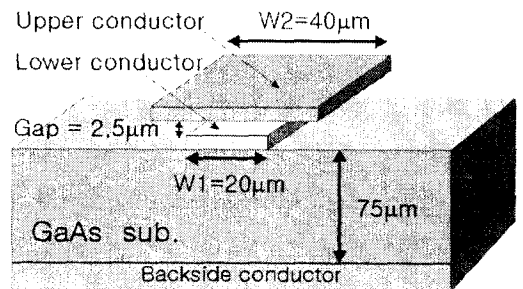
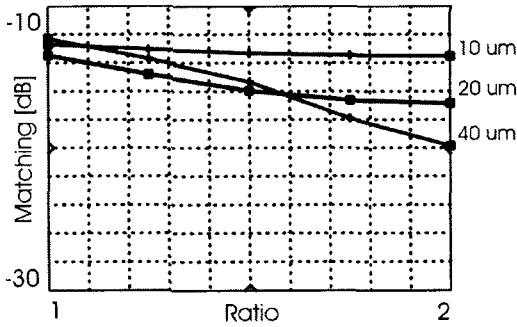
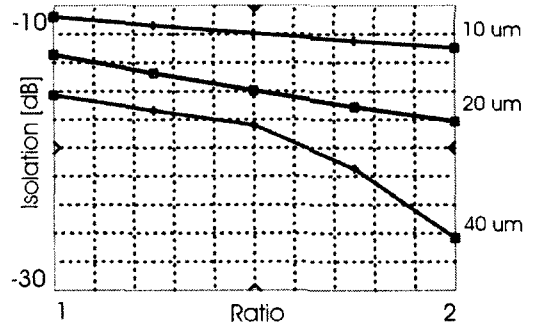


그림 1. 공기 절연 적층형 커플러 구조의 단면도

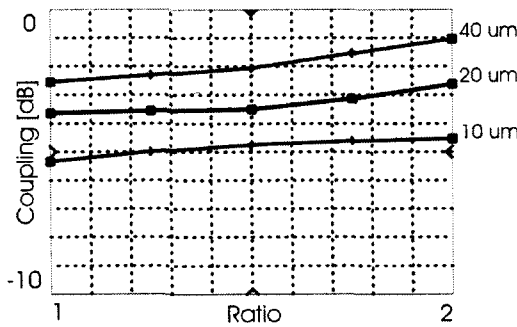
Fig. 1. Cross section of air-gap stacked coupler structure.



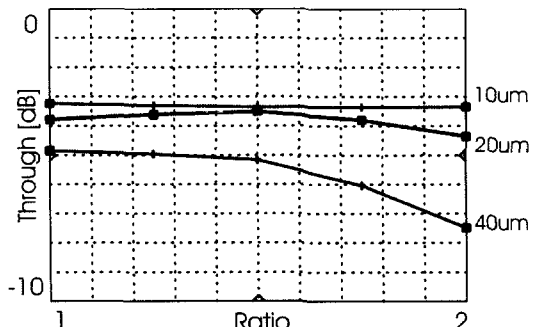
(a) Match 특성



(b) Isolation 특성



(c) Coupling 특성



(d) Through 특성

그림 2. HP-Momentum simulation으로 구해진 공기 절연 적층형 커플러의 S-parameter 특성
 Fig. 2. Simulated S-parameter of air-gap stacked coupler from the HP-Momentum.

의 폭의 변화에 따른 27 GHz에서의 S-parameter 특성을 보였다. 그림 2(a), (b)에서 matching과 isolation을 -15 dB 이하로 유지하는 조건을 찾으면 $W1 > 20 \mu\text{m}$, $\text{Ratio} > 1.5$ 가 된다. 그림 2(c)에서 커플링을 보면 위의 조건을 만족하는 경우 -3 dB 이상을 유지하고 있으며, 그림 2(d)에서 through 특성을 -5 dB 이상으로 유지하도록 한다면, 결국 $W1$ 은 $20 \mu\text{m}$ 정도가 적당하고, Ratio는 1.75 이상이면 적당하다. 공정상의 변화를 고려하여 $W1$ 은 $20 \mu\text{m}$, Ratio는 2로 하여 커플링을 조금 강하게 설계하였다.

III. 제 작

거의 대부분의 S-parameter 측정장비는 2-port

측정 시스템이므로, 4단자 소자인 커플러의 port-1과 port-3 사이의 커플링을 측정하려면, port-2와 port-4는 50Ω termination이 되어야 한다. 그러므로, 커플러 제작의 첫 단계는 NiCr 박막(약 800 \AA) 증착으로 시작되었다. 이 때 면저항은 $20 \Omega/\text{sq}$. 였다. 그 다음은 아래쪽 금속판을 위한 금속을 증착하였고, 그 위에 표준 air-bridge 공정을 이용하여 위쪽 금속판의 금속을 증착하였다. 마지막으로 뒷면을 갈아내고 via-hole 에칭을 한 다음, 접지를 위한 두꺼운 금속막 형성을 위하여 도금공정을 수행하였다. 이렇게 완성된 공기 절연 적층형 마이크로스트립 구조의 3 dB 방향성 커플러의 전자현미경(SEM) 사진을 그림 3에서 보였다. 그림 3에서 보듯이, 아래쪽 금속판 위에 위쪽 금속판이 $100 \mu\text{m}$ 간격의 지지대 (air-bridge post)를 통하여 안정적으로 떠있는 것을

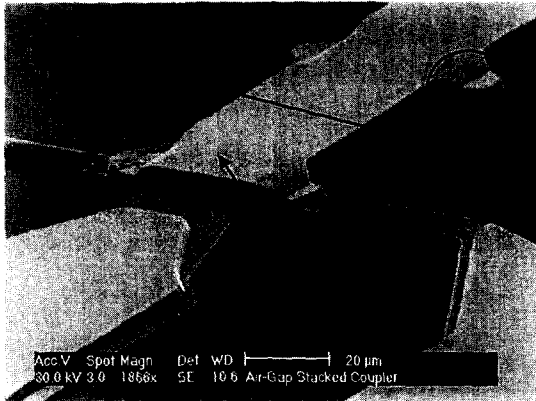


그림 3. 제작된 공기 절연 적층형 커플러의 전자현미경 사진

Fig. 3. SEM photograph of the fabricated air-gap stacked coupler.

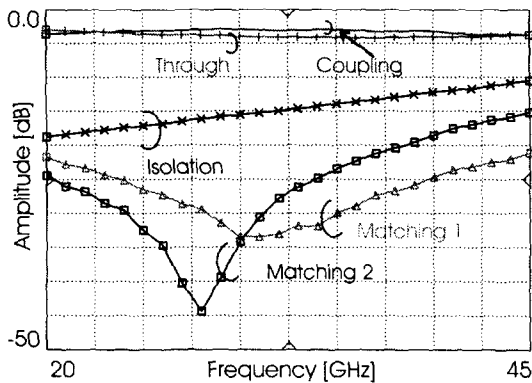


그림 4. 제작된 공기 절연 적층형 커플러의 S-parameter 특성

Fig. 4. Measured S-parameter characteristics of the air-gap stacked coupler.

볼 수 있다.

IV. 측정결과 및 응용

제작된 커플러의 S-parameter 특성은 Cascade 사의 on-wafer 측정 장비를 이용하여 측정하였다. 그림 4에서 측정된 커플러의 S-parameter 특성을 보여 주고 있다. 예상대로 3dB 커플링을 얻었으며,

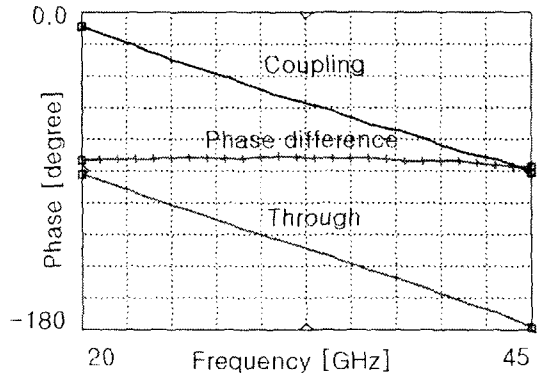


그림 5. 제작된 공기 절연 적층형 커플러의 출력단자 간 위상 특성

Fig. 5. Measured phase difference between two output ports of the air-gap stacked coupler.

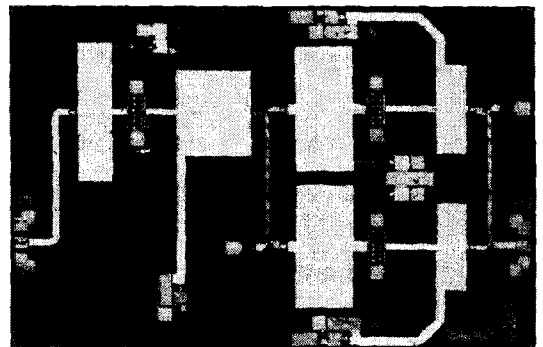


그림 6. 평형 2단 MMIC 전력 증폭기의 칩사진

Fig. 6. Microphotograph of the two stage balanced MMIC amplifier.

through 특성도 금속판의 폭이 넓기 때문에, 기존의 발표된 논문들에 비해 우수한 특성을 보였다. 그림 4에서 보듯이 22 GHz 대역폭(23 GHz~45 GHz)을 갖고 있으며, 대역 내에서 진폭 변화는 ± 0.5 dB 이하이다. 그림 4에서 두 금속판에서의 matching 특성이 모두 -15 dB 이하로 matching이 잘 되었음을 알 수 있고, isolation 특성은 주파수가 높아짐에 따라 점차적으로 나빠지는 특성을 보여주고 있지만, 대역폭 내에서는 -10 dB 이하로 양호한 결과를 보여 주고 있다. 그림 5에서 두 출력 단자의 위상특성

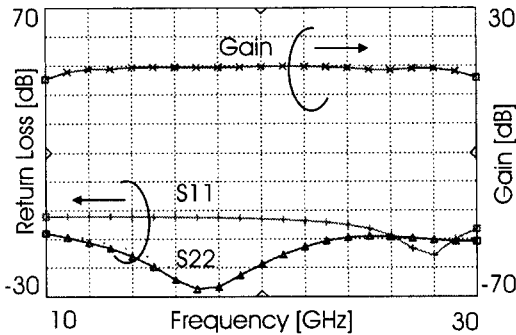


그림 7. 평형 2단 증폭기의 소신호 S-parameter 특성
 Fig. 7. Measured small signal S-parameter of the two-stage balanced amplifier.

을 보였다. 대역내에서 두 단자간의 위상차이는 85 ± 3 도(degree)로 거의 일정한 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 커플러를 이용하여 Ka-Band 용 평형 2단 전력 증폭기를 설계하였고, 본 연구실에서 개발한 PHEMT MMIC technology^{[5],[6]}를 이용하여 회로를 제작하였으며, 제작된 회로의 소신호 S-parameter 특성을 측정하였다. 그림 6에서는 제작된 평형 MMIC 전력 증폭기의 칩 사진이다. 앞단은 gain을 얻도록 설계하였고, 뒷단은 커플러를 이용하여 전력을 크게 얻을 수 있도록 설계하였다. 그림 7에서 제작된 회로의 소신호 S-parameter 특성을 보였다. 이득 특성이 12~29 GHz 까지 10 dB 정도로 매우 평탄한 특성을 나타내었고, 출력단의 반사손실(Return Loss) 역시 같은 주파수 대역에서 10 dB 이하의 우수한 특성을 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 공기 절연 적층형 마이크로스트립 구조의 새로운 MMIC 3 dB 커플러를 제안하였다. 제안된 커플러의 구조 해석을 위해서 HP-Momentum을 이용하였으며, 이를 통해 제안된 커플러의 구조를 최적화 하였다. 제안된 커플러는 표준 MMIC 공정에 추가적인 공정을 필요로 하지 않으며, 공정에서 흔히 발생하는 정렬오차(misalignment)에 둔

감한 장점을 갖고 있다. 제작된 커플러의 특성은 22 GHz 대역폭(23 GHz~45 GHz)을 갖고 있으며, 대역내에서 진폭 변화는 ± 0.5 dB 이하이다. 제안된 커플러를 이용하여 Ka-Band용 평형 2단 전력 증폭기를 성공적으로 제작하였다. 제작된 회로는 12~29 GHz 범위에서 10 dB의 이득 특성을 보였으며, 출력의 반사손실도 10 dB 이하의 우수한 특성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] J. Lange, "Interdigitated Striplines Quadrature Hybrid," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-17, December, 1969, pp. 1150-1151.
- [2] J. S. Izadian, "A New 6~18 GHz, -3 dB Multisection Hybrid Coupler Using Asymmetric Broadside, and Edge Coupled Lines," *IEEE MTT-S Digest*, 1989, pp. 243-247.
- [3] M. Nakajima and E. Yamashita, "A Quasi-TEM Design Method for 3dB Hybrid Couplers Using a Semi-Reentrant Coupling Section," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-38, no. 11, November, 1990, pp. 1731-1736.
- [4] D. Willems and I. Bahl, "A MMIC Compatible Coupled Line Structure that uses Embedded Microstrip to Achieve Extremely Tight Couplings," *1993 IEEE MTT-S Digest*, pp. 581-584.
- [5] H. Y. Cha, S. W. Paek, J. H. Lee, K. W. Chung, and K. S. Seo, "A study on PtGeAu thin ohmic contact for GaAs PHEMT," *Int'l Conf. GaAs Mantech. Dig.*, 1999, pp. 129-131.
- [6] J. H. Lee, D. H. Kim, Y. S. Park, M. K. Sohn, and K. S. Seo, "DC and RF characteristics of advanced MIM capacitors for MMICs using ultra-thin remote-PECVD

Si3N4 dielectric layers," will be published in *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* vol. 9, no. 9, Sep., 1999.

류 기 현



1969년 12월생
1993년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 3월~현재: 서울대학교 전자공학과(박사과정)

[주 관심분야] 초고주파 소자 대신호 모델링, 비선형 회로 설계

이 재 학



1964년 7월생
1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1990년 2월: 포항공과대학교 전자공학과(공학석사)
1996년 2월~현재: 서울대학교 전기공학부(박사과정)

1990년 3월~현재: LG전자 중앙연구소 연구원
[주 관심분야] 초고주파 소자 계면 최적화, MMIC 제작기술 연구

김 대 현



1974년 11월생
1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 3월~현재: 서울대학교 전기공학부(석사과정)
[주 관심분야] 초고주파 소자 특성 최적화 및 소신호 모델링, 새로운

MMIC 제작기술 연구

서 광 석



1955년 11월생
1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1978년 2월: 한국과학기술원 전자공학과(공학석사)
1987년 2월: University of Michigan (공학박사)

1999년 3월~현재: 서울대학교 교수
1992년 3월~1999년 2월: 서울대학교 부교수
1989년 3월~1992년 2월: 서울대학교 조교수
1987년 2월~1989년 2월: IBM T. J. Watson 연구소 연구원
1978년 3월~1982년 8월: 한국전자기술연구소 선임연구원
[주 관심분야] 초고주파 소자 제작, GaAs MMIC, MO-CVD 에피성장, RPCVD 박막성장.