

論文2002-39TC-12-6

본드와이어 트랜스포머를 이용한 집적형 발룬 (An Integrated Balun Using Bondwire Transformer)

方顯國*, 宋炳旭*, 李仲鎬*, 李海英**

(Hyon-Guk Pang, Byung-Wook Song, Joong-Ho Lee, and Hai-Young Lee)

요약

본 논문에서는 다양한 신호 정합 회로에 사용되는 발룬(balun)을 본드와이어 트랜스포머(bondwire transformer)를 이용하여 제작·측정하였다. 본드와이어 트랜스포머를 이용한 발룬은 적은 도체 및 기판 손실과 높은 공진 주파수 특성으로 광대역 특성과 저 삽입 손실을 구현할 수 있다. 제작·측정 결과, 가용 주파수 8.15~16.18 GHz에서 삽입 손실의 차이는 0.7 dB 이내이고 위상 차이는 2.5° 이내로 나타났다. 따라서, 제안된 발룬은 혼합기, 증폭기, 안테나의 연결부 등에 사용되어 전체적인 성능향상에 기여할 것으로 기대된다. 또한 제작 공정이 용이하고 크기 면에서도 나선형 구조의 발룬과 비견되기 때문에 다른 능·수동 소자와 함께 온-칩(on-chip)화가 가능할 것으로 예상된다.

Abstract

In this paper, an integrated balun using bondwire transformer is fabricated and measured. The bondwire transformer has low conductor and substrate loss and has high resonance frequency. So it is available to implement low loss broadband balun. From the measured results, 0.7 dB amplitude imbalance and about 2.5° phase imbalance was achieved from 8.15 to 16.18 GHz. It is expected that the proposed balun can improve the performance of mixers, amplifiers and matching networks of antennas. It can also be integrated with other components due to its easier fabrication and smaller size than spiral transformer balun.

Keywords : Balun, Bondwire, Transformer,

I. 서론

최근 이동 통신의 급격한 발달과 함께 통신용 부품의 저 전력, 저 가격, 소형화 및 경량화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 기기인 단말기 역시 송·수신부를 구성하고 있는 여러 칩 셋을 하나의 칩으로

통합하고자 연구되고 있다. 이를 위해서는 칩 내부에 사용되는 능·수동 소자의 고성능, 소형화가 선행되어야 한다. 이동 통신에 사용되는 여러 수동소자 중에서 발룬은 평형 혼합기(balanced mixer), 증폭기, 위상 천이기(phase shifter), 안테나와 저 잡음 증폭기(LNA: Low Noise Amplifier)의 연결부 등에 사용되는 중요한 소자이다^[1]. 발룬은 불평형 신호를 평형 신호로 바꾸어 주는 소자로서 출력 단에서 크기는 입력 신호의 반이고 서로 위상이 180° 차이를 갖는 신호를 얻을 수 있다. 지금까지 동축 발룬(coaxial balun), 결합 선로 발룬(coupled line balun), 집중정수 소자 발룬(lumped element balun) 등 다양한 구조의 발룬이 회로에 적용되어 왔다. 그 중 칩 내부에서도 구현이 가능한 구조는 마이크로스트립

* 學生會員, ** 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(Department of Electronics Engineering, Ajou Univ.)

※ 본 연구는 BK(Brain Korea)21 프로젝트의 지원을 받아 수행되었습니다.

接受日字:2002年8月26日, 수정완료일:2002年11月13日

선로(microstrip line)를 이용한 평면 형태의 발룬이다. 이와 같은 발룬은 대개 두 개의 나선형 인덕터(spiral inductor)가 상호 결합하는 형태의 다층 구조를 이용한다^[2,3]. 이 경우 기판에 의한 손실이 크고 턴간의 결합(coupling)되는 양을 증가시키기 위해 선 폭이 얇은 도선으로 턴 수를 증가시켜야 하기 때문에 도체 저항에 의한 손실이 증가하는 단점이 있다. 또한, 다층 구조의 경우 상층과 하층 사이의 높은 자기 결합이 이루어지지만 두 층을 연결하기 위해서는 많은 비아(via)를 사용해야 한다^[2]. 뿐만 아니라, 여러 개의 마스크가 필요하게 되어 제작 공정이 복잡하고 비용도 증가하게 된다. 10 GHz 이하에서 나선형 트랜스포머로 설계한 발룬의 경우 삽입 손실(insertion loss)이 3~4 dB 로 우수하게 나타났지만^[2,4], 10 GHz 이상에서 설계한 경우 삽입 손실이 전체적으로 5~6 dB 로 특성이 나빠졌다^[3,5]. 현가 공정(airbridge)을 이용한 구조의 경우 광 대역 특성을 나타내지만 삽입 손실이 전체적으로 5 dB 정도이고 두 출력 단에서의 크기도 일치하지 않는 경향이 나타났다^[6]. 굴곡 형태(meander shape)의 경우 크기는 상대적으로 많이 감소하였으나 역시 삽입 손실이 5 dB 이상으로 나타났다^[7].

본 논문에서는 나선형 다층 구조의 특성과 제작 상의 단점을 극복하기 위하여 본드와이어 트랜스포머^[8]를 이용한 발룬을 제안하고 제작하였다. 제안한 발룬의 해석은 FEM(Finite Element Method) 방식을 사용하는 상용 시뮬레이션 툴을 이용하였고^[9], 측정 결과 가용주파수 8.15~16.18 GHz에서 삽입 손실의 차이는 0.7 dB 이내이고 위상 차이는 2.5° 이내로 나타났다. 제안된 발룬이 고주파 영역에서 삽입 손실이 적은 이유는 금속 선로에 비해 본드와이어가 넓은 단면적을 가짐과 동시에 공기 중에 위치하고 있어 상대적으로 도체 저항과 기판에 의한 손실이 작기 때문이다. 또한, 나선형 트랜스포머에 비해 공진 주파수가 높기 때문에 고주파에서 상대적으로 넓은 대역폭을 갖는다. 따라서 제안된 발룬은 혼합기, 증폭기, 안테나 연결부 등에 적용되어 향상된 특성을 나타낼 것으로 기대된다. 또한 다층 구조와 달리 하나의 금속 층과 본드와이어만으로 구현되기 때문에 제작과 비용 면에서도 유리할 것으로 예상된다.

II. 구조 및 해석 방법

1. 해석 구조 및 방법

(1) 제안된 발룬의 구조

<그림 1>과 <그림 2>는 일반적인 Marchand 발룬과 본 논문에서 제안한 발룬의 구조를 나타내고 있다. Marchand 발룬은 보통 $\lambda/4$ 길이를 갖는 두 개의 커플러(coupler)를 서로 연결한 구조이다. 본 논문에서는 스트립라인 대신 본드와이어 트랜스포머로 $\lambda/4$ 길이의 커플러를 구성하였다. 제안된 발룬의 구조는 두께 600 μm 인 GaAs($\epsilon_r=12.9$) 기판 위에 두께 1 μm , 선폭 80 μm 인 스트립라인을 면적이 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ 인 본딩 패드와 연결한 후, 100 μm 간격으로 와이어 본딩한 구조이다. 본드와이어의 직경은 25 μm 이고 높이는 350 μm 로 설정하였다. <그림 2>에서처럼 제안된 발룬은 1 포트와 2 포트는 반전(inverting) 본드와이어 트랜스포머로 1 포트와 3 포트는 비 반전(non-inverting) 본드와이어 트랜스포머로 연결하여 구성하였다.

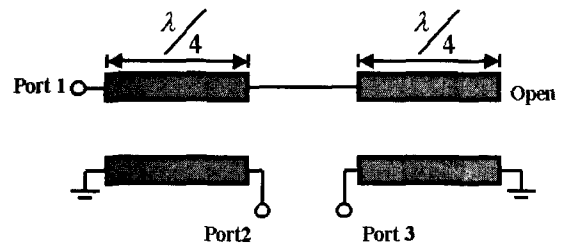


그림 1. 일반적인 Marchand 발룬
Fig. 1. Conventional Marchand Balun.

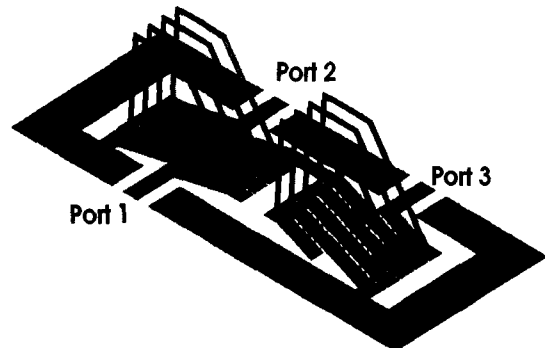


그림 2. 제안된 본드와이어 트랜스포머 발룬의 구조
Fig. 2. Proposed bondwire transformer balun structure.

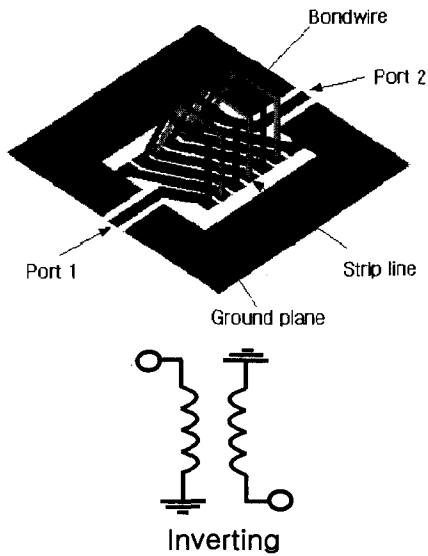


그림 3. 반전 본드와이어 트랜스포머
Fig. 3. Inverting bondwire transformer.

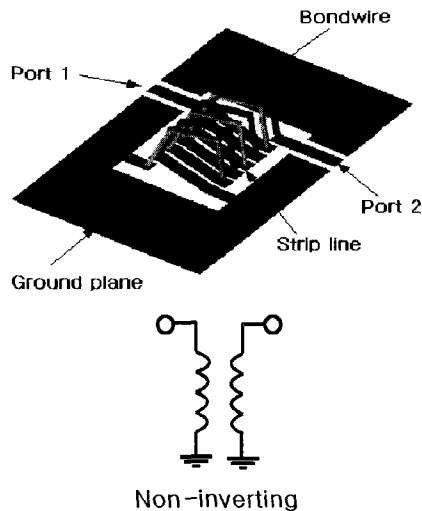


그림 4. 비 반전 본드와이어 트랜스포머
Fig. 4. Non-inverting bondwire transformer.



그림 5. 본드와이어와 스트립라인의 등가 모델
Fig. 5. Equivalent model of bondwire and stripline section.

<그림 3>에서처럼 반전 본드와이어 트랜스포머는 far-end coupling 구조로써 양쪽 포트에서부터 와이어의 감기는 방향이 서로 반대인 구조이다. 이 경우 각 포트

끝의 접지되는 위치가 서로 반대이기 때문에 인접한 턴 사이의 캐패시턴스에 전위차가 발생하게 된다. 이로 인해 1 포트의 위상이 180° 바뀌어 2 포트로 나오게 된다. 비 반전 본드와이어 트랜스포머의 경우 <그림 4>에서처럼 양쪽 포트에서부터 와이어의 감기는 방향이 서로 동일한 구조로 near-end coupling이 발생한다. 이 경우 각 포트 끝의 접지되는 위치가 서로 같기 때문에 인접한 턴 사이의 캐패시턴스는 전위차를 가지지 않게 된다. 이로 인해 1 포트의 위상이 변하지 않고 2 포트로 나오게 된다. 따라서 제안된 발룬의 두 출력 단에서의 위상은 서로 180° 차이가 나게된다. 제안된 구조는 나선형 구조와 달리 신호가 스트립라인으로 이루어진 부분과 본드와이어로 이루어진 부분을 통하여 진행하기 때문에 다음과 같은 방법으로 실효 유전 상수(effective dielectric constant : ϵ_{eff})를 계산하였다.

<그림 5>는 각각의 포트를 구성하고 있는 본드와이어와 스트립라인을 등가화 한 것이다. 본드와이어에 해당하는 길이 (l_1)와 스트립라인 (l_2)에 해당하는 길이를 신호가 각각의 영역을 진행할 때의 파장으로 나타내면, 본드와이어 부분을 진행할 때의 파장은 $\lambda_1 = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{eff1}}$ 이고 스트립라인 부분을 진행할 때의 파장은 $\lambda_2 = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{eff2}}$ 이므로 각 영역의 길이는 $l_1 = \alpha \lambda_1, l_2 = \beta \lambda_2$ 가 된다. (단, α, β 는 상수) 본드와이어의 경우 $\epsilon_r = 1$ 이고 GaAs 기판 위에 위치한 스트립라인의 경우 $\epsilon_r = 12.9$ 이므로 아래 식 (1)로부터 각각의 실효 유전 상수를 구하면 $\epsilon_{eff1} = 1, \epsilon_{eff2} \approx 7$ 이 된다.

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/w}} \quad (1)$$

위에서 계산된 각 영역의 길이의 합 (l_{total})은 중심 주파수에서 $\lambda_g/4$ 가 되어야 하므로

$$l_{total} = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{eff}}} = l_1 + l_2 \quad (2)$$

$$l_1 + l_2 = \left(\frac{\alpha}{\sqrt{\epsilon_{eff1}}} + \frac{\beta}{\sqrt{\epsilon_{eff2}}} \right) \lambda_0 \quad (3)$$

이다. 식(2)과 식(3)로부터 제안한 구조에서의 실효 유전 상수를 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\left(4 \left(\frac{\alpha}{\sqrt{\epsilon_{eff1}}} + \frac{\beta}{\sqrt{\epsilon_{eff2}}} \right) \right)^2} \quad (4)$$

우선 실효 유전상수를 구하기 위하여 임의의 구조를 해석하였다. 해석한 구조는 각각의 포트가 길이 780 μm 인 스트립라인 2.5개와 높이 350 μm 인 본드와이어 2개로 구성하였다. 해석 결과 6 GHz 에서 삽입 손실이 최대가 되었고 위의 식 (4)를 이용하여 실효 유전상수 $\epsilon_{\text{eff}}=4.8$ 을 얻었다. 여기서 구한 실효 유전상수 값을 이용하여 13 GHz에서의 파장 (λ_g)을 계산한 후 본드와이어에 해당하는 길이 (l_1)와 스트립라인에 해당하는 길이 (l_2)를 각각 결정하였다. 그 결과 각각의 포트는 길이 600 μm 인 스트립라인 2.5개와 높이 350 μm 인 본드와이어 2개로 구성된 발룬을 설계하였다.

(2) 제작한 발룬의 구조

<그림 6>은 본 논문에서 제안된 본드와이어 트랜스포머를 이용한 발룬의 제작된 구조를 나타낸 사진이다. <그림 6>에서처럼 1 포트와 2 포트는 반전 본드와이어 트랜스포머이고 1 포트와 3 포트는 비 반전 본드와이어 트랜스포머 구조이다. 이 구조는 두께 600 μm 의 GaAs 기판 위에 크기가 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ 인 본딩 패드 사이를 높이가 350 μm 인 본드와이어로 와이어 본딩한 구조이다. 각 본드와이어 사이의 간격은 제작상의 신뢰성을 보장하기

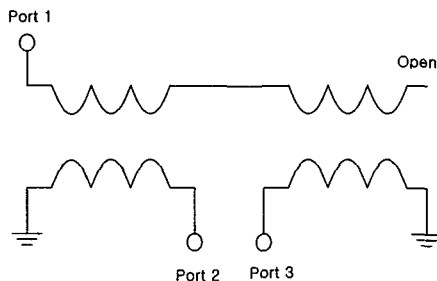
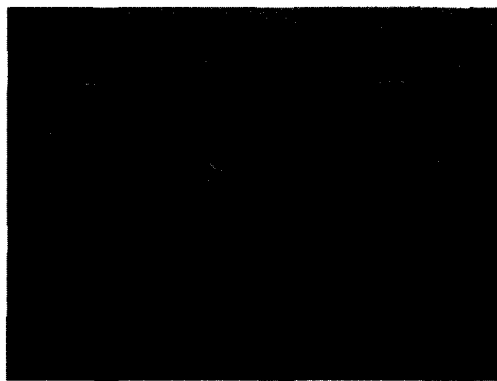


그림 6. 제작한 발룬과 간략도
Fig. 6. Fabricated balun and schematic diagram.

위하여 자동 와이어 본딩 머신으로 100 μm 간격으로 본딩 되었다. 제작에 사용된 와이어의 직경은 25.4 μm 이고 제작된 발룬의 크기는 $0.6 \times 1.4 \text{ mm}$ 이다.

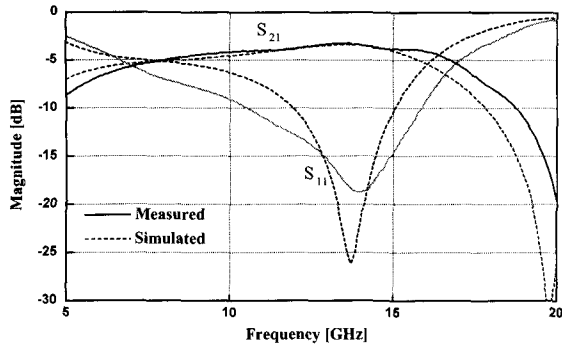
(3) 해석 및 측정 방법

설계한 발룬의 해석은 완전 수치 해석법(full-wave analysis)인 유한 요소법(FEM)을 사용하는 상용 시뮬레이션 툴을 이용하여 5 GHz부터 20 GHz까지 해석을 수행하였고, 전체 S-parameter의 크기 변화율이 3% 이내에 수렴하도록 유한 요소 mesh 생성을 반복 수행하였다. 제안된 구조에서 도체 손실을 고려하기 위하여 본드와이어와 두께가 1 μm 인 스트립라인은 금(Au)으로 설정하였다. 입력 단 (Port 1)과 출력 단 (Port 2, Port 3)을 제외한 경계 면에서의 방사 효과를 고려하기 위해 흡수 경계 조건(ABC: Absorbing Boundary Condition)을 적용하였다. 또한, 각각의 포트는 On wafer probing을 위해 CPW(Coplanar Waveguide)구조를 적용하였다. 제작된 발룬의 측정은 벡터 회로망 측정기(VNA: Vector Network Analyzer)에 CPW microwave probe를 연결하여 3-port S-parameter를 추출하였다.

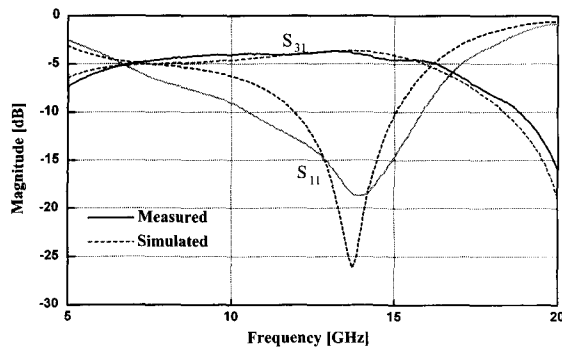
III. 해석 및 측정 결과

<그림 7>은 제안된 발룬의 FEM 해석 결과와 측정 결과를 비교한 그림이다. <그림 7(a)>는 출력 단인 2 포트의 삽입 손실(S_{21})을 <그림 7(b)>는 3 포트의 삽입 손실(S_{31})을 나타내었다.

<그림 7>에서처럼 해석 결과와 측정 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 측정 결과 중심 주파수 13.9 GHz에서 반사 손실은 19 dB였고, 두 출력 단의 삽입 손실은 각각 3.3 dB와 3.6 dB로 나타났다. 이는 나선형 구조의 발룬을 같은 주파수대에서 구현했을 때에 비해 삽입 손실이 약 2 dB 정도 개선됐음을 알 수 있다^[3]. 이처럼 같은 중심 주파수에서 나선형 구조에 비해 삽입 손실이 적은 이유는 금속 선로에 비해 본드와이어의 넓은 단면적으로 인해 상대적으로 도체 저항이 작기 때문이다. 또한 본드와이어가 손실 없는 공기 중에 위치하기 때문에 나선형 다층구조에 비해 기판 손실이 작기 때문이다. 측정 결과를 보면 중심 주파수가 해석 결과에 비해 약 200 MHz 정도 증가한 것을 알 수 있다. 이는 해석 시 사용한 본드와이어의 길이보다 실제 제작한 본드와이어의 길이가 짧아져 인덕턴스가 줄었기 때문이다. <그림 8>은 출력 단에서의 삽입 손실 차이와 위상 차를 나타낸 그림이다.



(a)



(b)

그림 7. (a) 출력 단 (2 port)의 삽입 손실 (S21) (b) 출력 단 (3 port)의 삽입 손실 (S31)

Fig. 7. (a) Insertion loss (S21) of the output port (2 port). (b) Insertion loss (S31) of the output port (2 port).

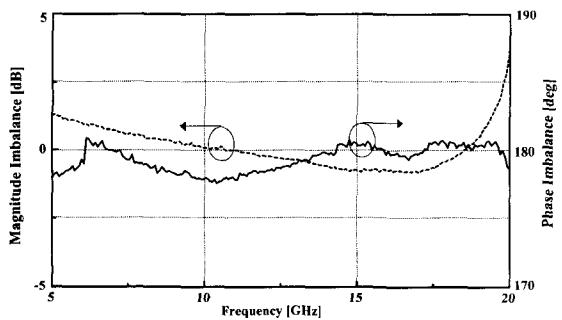


그림 8. 측정된 출력 단의 삽입 손실 및 위상차 비교
Fig. 8. Comparison of the measured insertion loss and phase imbalance of output ports.

<그림 8>에서처럼 중심 주파수에서 두 출력 단의 삽입 손실 차는 약 0.3 dB 정도였고 위상 차이는 중심 주파수에서 약 0.2° 로 나타났다. 발룬으로 동작 가능한 주

파수대역을 중심 주파수를 기준으로 삽입 손실의 차이가 ± 1 dB 이내이고 위상 차이가 $180 \pm 10^\circ$ 이내인 주파수 범위라고 하면^[7], 제안된 발룬의 가용 주파수범위는 8.15~16.18 GHz이고 이 범위 내에서 삽입 손실의 차이는 0.7 dB 이내이고 위상차이는 2.5° 이내로 나타났다. 이처럼 제안된 발룬이 고주파에서 넓은 주파수 대역을 갖는 이유는 본드와이어 트랜스포머의 공진 주파수가 나선형 트랜스포머나 다른 구조에 비해 상대적으로 높기 때문이다^[8].

III. 결론

본 논문에서는 본드와이어 트랜스포머를 이용한 새로운 발룬을 제안하였다. 제안된 발룬의 해석은 FEM을 이용하였고 실제 GaAs 기판 위에 제작하였다. 제안된 발룬은 반전 본드와이어 트랜스포머와 비 반전 본드와이어 트랜스포머를 연결하여 구성하였다. 측정 결과 13.9 GHz에서 두 출력 단의 삽입 손실이 최대로 나타났으며 가용 주파수 범위 8.15~16.18 GHz 내에서 삽입 손실 차이는 0.7 dB 이내였고 위상 차이도 2.5° 이내로 나타남을 알 수 있었다. 제안된 발룬의 경우 나선형 구조와 달리 본드와이어의 대부분이 손실이 없는 공기 중에 위치하고 있고 금속 선로에 비해 상대적으로 넓은 단면적을 가짐으로써 유전 손실 및 도체 손실을 줄일 수 있는 구조이며, 추가 공정 없이 일반적인 와이어 본딩 기술로 구현이 가능하다. 크기 면에서도 기존의 나선형 구조와 비슷하기 때문에 다른 능·수동 소자와 함께 온-칩화가 가능하다. 또한, 스트립라인과 본드와이어의 길이를 적당히 조절함으로써 원하는 주파수 대역에서 동작하는 발룬의 설계가 가능할 것으로 예상되며 이 부분에 대해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요하다. 따라서, 제안된 발룬은 평형 혼합기, 증폭기 등의 입·출력 단이나 안테나와 RF 전단(RF front-end)의 연결부 등에 적용되어 전체적인 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] Jong-Wook Lee and Webb,K.J, "A low-loss planar microwave balun with an intergrated bias scheme for push-pull amplifiers," IEEE MITT-S International, Microwave Symposium Digest,

- vol.1, pp. 197~200, 2001.
- [2] Yoon Y.J, Yicheng Lu, Frye R.C and Smith, P.R, "A silicon monolithic spiral transmission line balun with symmetrical design," IEEE Electron Device Letters, vol.20, Issue:4, pp. 182~184, April. 1999.
- [3] Gokdemir T, Economides S.B, Khalid A, Rdzazadeh A.A and Robertson I.D, "Design and performance of GaAs MMIC CPW baluns using overlaid and spiral couplers," IEEE MTT-S International, Microwave Symposium Digest vol.2, pp. 401~404, 1977.
- [4] Ang K.S, Economides S.B, Nam S and Robertson I.D, "A compact MMIC balun using spiral transformers," Microwave Conference, 1999 Asia Pacific, pp. 655~658, vol.3, 1999.
- [5] M. Engels and R.H. Jansen, "A novel compact balun structure for multilayer MMICs," 26th EuMC, pp. 692~696, September. 1996.
- [6] Shimozawa M, Itoh K, Sasaki Y, Kawano H, Isota Y and Ishida O, "A parallel connected Marchand balun using spiral shaped equal length coupled lines," IEEE MTT-S International, Microwave Symposium Digest, vol.4, pp. 1737~1740, 1999.
- [7] Nishikawa K, Toyoda I and Tokumitsu T, "Compact and broad-band three-dimensional MMIC balun," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol.47, pp. 96~98, Jan. 1999.
- [8] Byung_Wook Song, Sung-Jin Kim and Hai-Young Lee, "Vertical integrated transformer using bondwires for MMIC's," IEEE MTT-S International, Microwave Symposium Digest vol.3, pp. 1341~1344, 2000.
- [9] HFSS(High Frequency Structure Simulator), ver8.0, Ansoft.

저자 소개



方顯國(學生會員)

2002년 : 아주대학교 전자공학부 졸업. 현재 : 아주대학교 대학원 전자공학부 석사과정. <주관심분야 : 초고주파 수동소자 개발 및 RFIC>

李仲鎭(學生會員) 第37卷 TC篇 第5號 參照

현재 : 한국 전자 종합 연구소 연구원

宋炳旭(學生會員) 第39卷 D編 第11號 參照

현재 : 아주대학교 전자공학부 박사과정

李海英(正會員) 第36卷 D篇 第11號 參照

현재 : 아주대학교 전자공학부 교수