

# MMIC 응용을 위한 초소형 능동형 90° 전력 결합기

## A Highly Miniaturized Active 90° Power Combiner for Application to MMIC

박 영 배 · 윤 영

Young-Bae Park · Young Yun

### 요 약

본 논문에서는 MMIC 응용을 위한 초소형화된 능동형 90° 전력 결합기를 제안한다. 기존의 수동형 90° 전력 결합기는 매우 큰 크기 때문에 MMIC 상에 집적되어질 수가 없다. 따라서 초소형화된 90° 전력 결합기는 고집적된 MMIC의 개발을 위해 요구되어진다. 본 논문을 위해서 InGaP/GaAs HBT를 이용한 초소형화된 능동형 90° 전력 결합기는 고집적된 MMIC 응용을 위해 GaAs 기판 상에 제작하였다. 제작된 능동형 90° 전력 결합기의 크기는 2.42×1.05 mm이며, 이는 기존의 수동형 90° 전력 결합기의 약 2.2 % 정도의 크기였다. 제작된 능동형 90° 전력 결합기는 2.4 GHz에서 기존의 수동형 90° 전력 결합기보다 약 10 dB의 이득 특성과 -92.6°의 양호한 위상차 결합 특성을 보였다. 초소형화된 능동형 90° 전력 결합기는 기존의 수동형 90° 전력 결합기들에 비해서 좋은 RF 성능을 나타내었다. 본 논문은 능동형 90° 전력 결합기에 대한 최초의 보고이다.

### Abstract

This paper proposes the highly miniaturized active 90° power combiner for application to MMIC. Conventional passive 90° power combiners can't be integrated on MMIC because of their very larger size. Therefore, the highly miniaturized 90° power combiners are required for a development of highly integrated MMIC. For this paper, the highly miniaturized active 90° power combiner employing InGaP/GaAs HBT was fabricated on GaAs substrate for application to highly integrated MMIC. A size of fabricated active 90° power combiner was 2.42×1.05 mm, which was 2.2 % of conventional passive 90° power combiner. The fabricated active 90° power combiner showed a gain characteristic about 10 dB and a good phase-difference coupling characteristic of -92.6° than conventional passive 90° power combiner at 2.4 GHz. The highly miniaturized active 90° power combiner exhibited good RF performances comparable to conventional passive 90° power combiners. This work is the first report of an active 90° power combiner.

Key words : Active 90° Power Combiner, GaAs MMIC, HBT, Coupler

### I. 서 론

무선 통신 시스템용 MMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuit)에는 LNA(Low Noise Amplifier), 믹서(mixer), 증폭기(amplifier) 그리고 전력 증폭기(power amplifier)와 같은 회로들이 집적되어져 있다. 이들

중 믹서의 경우 이미지 신호(image signal) 등의 불요파 신호 제거를 목적으로, 90° 전력 분배기 및 전력 결합기에 의해 구성된 싱글 밸런스(singly balanced) 믹서가 널리 이용이 되고 있다<sup>[2]</sup>. 특히, 밸런스형 믹서의 입력과 출력단에 90° 전력 분배기와 결합기를 이용하면 대역 통과 필터(band pass filter)보다 정확

「This work was supported by the Post Brain Korea 21 Project.」

한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Korea Maritime University)

· 논문 번호 : 20070612-062

· 수정완료일자 : 2007년 8월 30일

하게 이미지 신호를 제거할 수 있다. 따라서 이제까지는 대부분이 수동형 90° 전력 분배기 및 결합기가 사용되고 있으며<sup>[1]~[4]</sup>, 대표적인 수동형 90° 전력 분배기 및 결합기에는 브랜치 라인 커플러(branch-line coupler)와 Lange 커플러 등이 있다. 그러나 수신용 밸런스 믹서<sup>[5]</sup>의 경우, 출력단은 RF 신호보다 매우 낮은 주파수를 가지는 IF 신호가 출력되므로, 출력단에 존재하는 IF 전력 결합용 90° 전력 결합기는 매우 큰 사이즈를 가진다. 예를 들면, IF 신호가 2.4 GHz 일 경우, 수신단에 사용되는 수동형 90° 브랜치 라인 커플러의 크기는 10.56×10.92 mm로 수신단 칩(chip)의 면적보다 훨씬 큰 면적을 가지게 된다. 이와 같이 수동형 90° 전력 결합기를 사용하는 경우, 그 크기가 너무 크기 때문에 실질적으로 MMIC 상에 집적하는 것은 불가능하며, 결과적으로 큰 면적의 수동형 전력 결합기들은 MMIC가 실장된 프린트 기판 상에 제작이 되어져서 사용이 된다. 이러한 문제점은 MMIC의 실장 모듈(module) 면적의 증가와 모듈 실장에 의한 가격 상승의 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 MMIC 상에 집적이 가능한 초소형화된 능동형 90° 전력 결합기의 개발이 필수적이다. 그러나 현재까지는 능동형 90° 전력 결합기에 대한 연구 결과는 보고된 것이 없다.

본 논문에서는 InGaP/GaAs HBT(Heterojunction Bipolar Transistor) 소자를 이용하여 MMIC 상의 수동형 커플러를 소형화하기 위하여 능동형 90° 전력 결합기를 제안한다. 본 논문에서는 일반적인 회로 구조인 공통-이미터 회로(common-emitter circuit)와 공통-컬렉터 회로(common-collector circuit)를 결합한 형태의 회로 구조를 이용하여, 90° 위상차 및 동전력 결합 특성을 가지도록 회로 소자의 값을 결정하였다. 제작된 능동형 90° 전력 결합기는 기존의 수동형 90° 전력 결합기인 브랜치 라인 커플러의 약 2.2%로 크기가 대폭 축소되었으며, 양호한 RF 특성을 보여주었다. 본 논문은 능동형 90° 전력 결합기에 대한 최초의 보고이다.

## II. 회로 설계

그림 1과 같이 사용되는 회로 구조는 공통-이미터 회로와 공통-컬렉터 회로를 사용하고 있다. 일반적

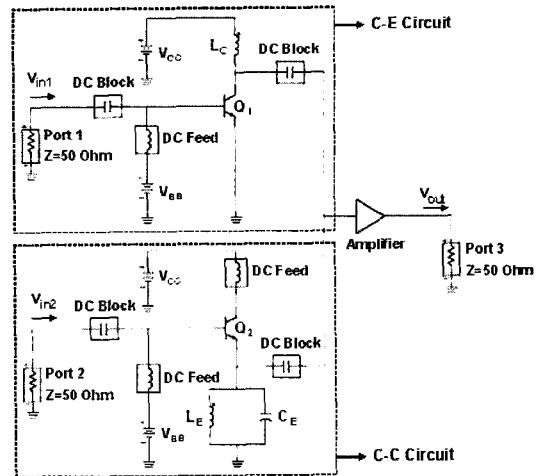


그림 1. 능동형 90° 전력 결합기의 회로도  
Fig. 1. A schematic of active 90° power combiner.

인 공통-이미터 회로는 베이스에서 입력된 신호와 컬렉터에서 출력된 신호의 위상 차이는 180° 반전된 위상이 출력되며, 일반적인 공통-컬렉터 회로는 베이스에서 입력된 신호와 이미터에서 출력된 신호의 위상 차이는 0°의 반전되지 않은 위상이 출력된다<sup>[6],[7]</sup>. 이와 같이 일반적인 공통-이미터 회로와 공통-컬렉터 회로만으로는 90° 위상차 특성과 동전력 결합 특성을 가지지 못한다. 따라서 본 논문에서 그림 1과 같이 새로운 형태의 회로 구조를 제안한다.

그림 1과 같이 공통-이미터 회로 구조와 공통-컬렉터 회로 구조를 병렬로 연결시키고, 각각의 출력단을 결합해서 출력 신호를 결합시키는 형태의 회로 구조를 제안한다. 제안된 회로에서 입력 신호는 HBT 소자의 베이스에 각각 신호를 입력시키고, 출력 신호는  $Q_1$ 의 컬렉터와  $Q_2$ 의 이미터에서 출력된 신호가 결합되어져 출력되는 회로 구조를 보여주고 있다.

$$A_{vl} = \frac{V_{out}}{V_{inl}} = \frac{-jX_C}{r_c} \quad (1a)$$

$$\left( jX_C = j\omega L_C, r_c = \frac{V_T}{I_E} \right) \quad (1b)$$

제안된 구조에서  $Q_1$ 의 출력 이득 특성, 즉 포트 1에서 입력된 신호가 포트 3으로 출력될 때의 이득 특성은 식 (1)과 같이 표현된다.

식 (1)과 같이  $Q_1$ 의 출력 이득 특성은 교류 이미터 저항( $r_e$ )과 컬렉터 리액턴스( $X_C$ )의 관계로 나타낼 수 있다.  $Q_1$ 의 출력 위상 특성은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\angle A_{v1} = -90^\circ \quad (2)$$

식 (2)와 같이  $Q_1$ 의 출력 위상 특성은  $-90^\circ$ 의 위상을 가지는데, 이것은 식 (1)에서 보는 바와 같이 위상에 영향을 주는 것은  $-j\omega L_C$  성분에 의해서 출력 위상각이  $-90^\circ$ 로 결정이 된다. 그리고 교류 이미터 저항( $r_e$ )은 실수 값만을 가지기 때문에 출력 위상각에 영향을 미치지 않게 된다.

$Q_2$ 의 출력 이득 특성, 즉 포트 2에서 입력된 신호가 포트 3으로 출력될 때의 이득 특성은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$A_{v2} = \frac{V_{out}}{V_{in2}} = \frac{jX_E}{r_e + jX_E} \quad (3a)$$

$$\left( X_E = \frac{\omega L_E}{1 - \omega^2 L_E C_E}, r_e = \frac{V_T}{I_E} \right) \quad (3b)$$

식 (3)과 같이  $Q_2$ 의 출력 이득 특성은 교류 이미터 저항( $r_e$ )과 이미터 리액턴스( $X_E$ )의 관계로 나타낼 수 있다.

$Q_2$ 의 출력 위상 특성은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\angle A_{v2} = \tan^{-1} \left( \frac{r_e}{X_E} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \angle A_{v1} - \angle A_{v2} &= -90^\circ - \tan^{-1} \left( \frac{r_e}{X_E} \right) \\ &= -90^\circ \end{aligned} \quad (5)$$

따라서  $Q_1$ 과  $Q_2$ 의 출력에서  $90^\circ$  위상차 결합 특성은 식 (5)와 같이 표현되고,  $90^\circ$  위상차 결합 특성을 만족시키기 위해서는, 포트 1과 2에서 입력된 신호가 각각 포트 3으로 출력될 때, 이들 신호간의  $90^\circ$  위상차가 되기 위해서 식 (5)가 만족되어야 한다.

식 (3)~(5)에서 알 수 있는 바와 같이,  $Q_2$ 의 이미터단에 접속된  $L_E$ 와  $C_E$ 를 변화시키면 식 (3)으로부터  $X_E$ 가 변화되고, 이로 인해 식 (4)로부터 위상각  $\angle A_{v2}$ 가 변화됨을 알 수 있다. 따라서 식 (5)로부터  $L_E$ 와  $C_E$ 값을 적절히 선택하면  $90^\circ$  위상차 결합 특성을 얻을 수 있음을 상기 식으로부터 알 수 있다. 그

래서 본 논문에서는 그림 1의  $Q_2$ 의 출력 위상 특성은 이미터단 아래에 병렬로 연결되어진 인덕터와 캐패시터를 이용해서 출력 위상을 조정하는 방법을 제안한다. 일반적으로는 병렬 LC 회로보다는 큰 저항 값을 가지는 저항 소자를 사용해서 설계가 이루어진다. 본 논문에서는 저항 소자를 이용하지 않고 설계를 하였는데, 그 이유는 HBT 소자가 동작하면서 포화 영역이 아닌 비포화 영역 또는 차단 영역으로의 동작 영역 이탈을 방지하고, 저항 소자로 인해서 발생하는 수신단 열 잡음 특성으로 인해 제한된 능동형  $90^\circ$  전력 결합기의 잡음지수(noise figure) 증가를 미연에 방지하기 위한 목적으로 무손실 소자인 병렬 LC 회로를 적용하였다. 식 (5)에서 알 수 있는 바와 같이 입력 신호간 위상차가  $90^\circ$ 가 되기 위해서는  $X_E = \infty$ 가 되어야 하며, 식 (3)으로부터 아래의 식이 만족되어야 함을 알 수 있다.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_E C_E}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} |A_{v1}| &= |A_{v2}|, \quad \left| \frac{-jX_C}{r_e} \right| = \left| \frac{jX_E}{r_e + jX_E} \right| \approx 1 \\ (X_E = \infty) \end{aligned} \quad (7)$$

즉, 식 (6)으로부터  $X_E = \infty$ 가 되므로,  $|A_{v2}| = 1$ 이 되므로, 결국  $|A_{v1}| = 1$ 도 만족되어야 한다. 결국 동전력 결합 특성을 위해서는 식 (7)로부터 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$X_C = \omega L_C = r_e \quad (8)$$

본 논문에서는 그림 1의 능동형  $90^\circ$  전력 결합기가  $90^\circ$  위상차 및 동전력 결합 특성을 가지도록 하기 위해서, 식 (6)과 (8)을 이용하여 적절한  $L_C$ ,  $L_E$ ,  $C_E$  값을 결정하였다.

### III. 측정 결과

논문에서 제안하는 회로 구조 및 설계 방법의 검증을 위해 2.4 GHz에서 GaAs 기판 위에 InGaP/GaAs HBT를 이용하여 제안된 회로를 제작하였다.

그림 2는 제작된 회로의 사진을 보여준다. 제작된 능동형  $90^\circ$  전력 결합기의 크기는 후단의 증폭기를 포함하여  $2.42 \times 1.05$  mm이며, 표 1을 보게 되면 이는

표 1. RF 특성 비교

Table 1. RF characteristic comparison.

	기존의 1/4 λ 브랜치 라인 커플러 <sup>[1]</sup> (Simulation results)	집중소자를 이용한 브랜치 라인 커플러 <sup>[3]</sup> (Simulation results)	본 논문에서 제안된 능동형 90° 전력 결합기 (Measurement results)
Circuit size [mm]	10.56×10.92	5.46×5.66	2.42×1.05
Size comparison [%]	100	26.8	2.2
Power loss [dB]	-3.65	-4.18	×
Linearity	∞	∞	P <sub>1dB</sub> =-3 dBm
Isolation characteristic [dB]	-30.2	-28.4	-26.6
Amplitude balance characteristic [dB]	-3.65/-3.61 (@ 2.4 GHz)	-3.84/-4.18 (@ 2.4 GHz)	10.5/10.3 (@ 2.4 GHz)
Power consumption	×	×	187 mW
Band width [MHz](90°±5°)	640 (2.09~2.73 GHz)	80 (2.34~2.42 GHz)	330 (2.24~2.57 GHz)

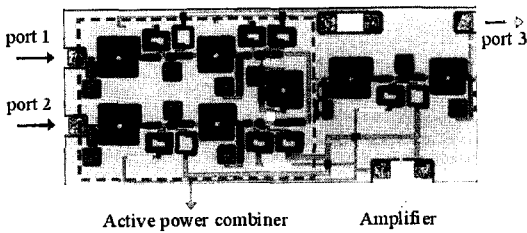


그림 2. InGaP/GaAs HBT를 이용한 초소형화된 능동형 90° 전력 결합기의 사진

Fig. 2. A photograph of a highly miniaturized active 90° power combiner employing InGaP/GaAs HBT.

동일한 GaAs 기판(기판 두께 95 μm, 유전율 12.85) 조건에서 제작된 기존의 수동형 90° 전력 결합기인 브랜치 라인 커플러<sup>[1]</sup>의 크기와 비교한 결과 2.2%의 크기를 보이며, 또 축소된 형태의 집중 소자를 이용한 브랜치 라인 커플러<sup>[3]</sup>의 크기와 비교한 결과 8.2%의 크기를 가지고 있다.

표 1의 기존의 수동형 브랜치 라인 커플러와 집중 소자를 이용한 브랜치 라인 커플러의 RF 특성 비교 결과를 보면, 본 논문의 능동형 90° 전력 결합기는 기존의 수동형 브랜치 라인 커플러와 다르게 능동 소자를 사용으로 인해서 전력 소모가 존재하고, 비선형소자의 사용으로 인해 비선형 특성이 나타나는데 본 논문의 능동형 90° 전력 결합기는 P<sub>1dB</sub>=-3 dBm의 특성을 보여주고 있다. 본 논문에서는 ISM

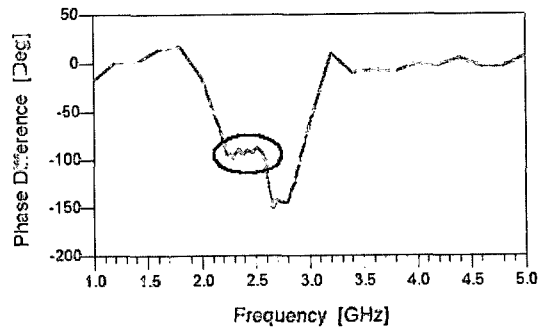


그림 3. 90° 위상차 결합 특성에 대한 측정된 결과  
Fig. 3. Measured result for 90° phase-difference coupling characteristic.

대역 등의 S-밴드 무선 통신의 응용을 위해 2.4 GHz의 중심 주파수로 회로 설계를 수행하였다.

그림 3은 제작된 능동형 90° 전력 결합기 회로에서 출력되는 두 신호의 90° 위상차 결합 특성을 보여주고 있다. 즉, 그림 1의 포트 1에서 입력된 신호와 포트 2에서 입력된 신호가 포트 3에서 출력될 때, 이들 두 출력 신호간의 위상차에 대한 측정 결과이며, 식  $phase\ difference = phase(S_{31}) - phase(S_{32})$ 는 S-parameter로 이루어진 식으로부터 측정하였다. 측정된 결과를 보게 되면 중심 주파수 2.4 GHz에서 -92.6°의 위상차 결합 특성이 관찰되었다.

그림 4는 전력 결합 특성 측정 결과(S<sub>31</sub>, S<sub>32</sub>)를 보여준다. 수동형 브랜치 라인 커플러와 Lange 커플러

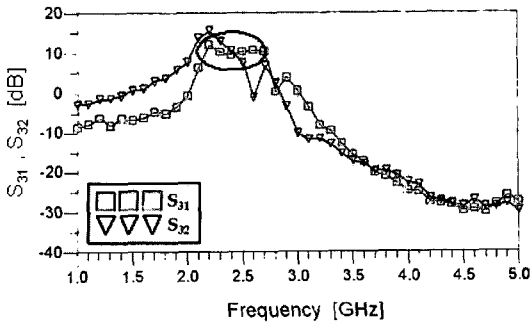


그림 4. 출력 이득 결합 특성에 대한 측정 결과  
Fig. 4. Measured results for output gain coupling characteristics.

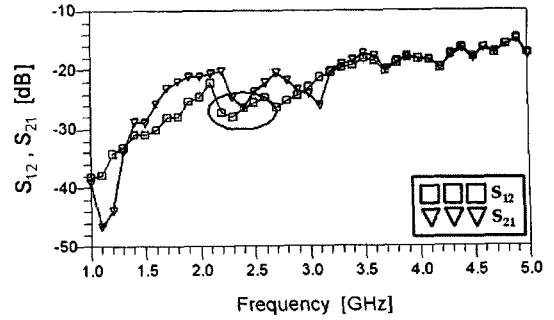


그림 5. 포트 1과 2의 격리 특성에 대한 측정된 결과  
Fig. 5. Measured results for isolation characteristics of port 1 and 2.

등의 기존의 수동형 90° 전력 결합기의 경우, 이상적인 경우 -3 dB의 전력 분배/결합 손실을 가지지만, 실제 기판 손실 등을 고려하면 -4~ -5 dB 정도의 전력 분배/결합 손실을 가진다. 그러나 그림 1, 2에서 알 수 있는 바와 같이, 본 논문의 능동형 90° 전력 결합기의 뒷단에는 증폭기가 집적되었으며, 따라서, 본 논문의 능동형 90° 전력 결합기는 기존의 수동형 90° 전력 결합기와는 달리 동작 주파수에서 동전력 결합 특성을 보여주고 있다. 이로 인해 본 논문의 능동형 90° 전력 결합기를 사용하면, RF 모듈 상에서 추가적인 증폭기의 사용이 불필요하게 된다. 그림 4에서 보는 바와 같이,  $S_{31}$ 과  $S_{32}$ 는 모두 2.4 GHz에서 약 10 dB의 동일한 출력 이득 특성을 보여주고 있다. 그리고 그림 1에서 능동형 90° 전력 결합기의 종단과 증폭기의 입력단 사이의 위치에서 다양한 부하의 변화로 인해 출력 위상차 결합 특성의 위상의 변화는 거의 발생하지는 않지만, 출력 이득 특성  $S_{31}$ 과  $S_{32}$ 의 출력 이득은 부하의 변화에 의해 출력 이득의 변화가 크게 발생하게 된다.

그림 5는 입력 포트 1과 2 사이의 격리 특성을 보여주고 있다. 입력 포트 1과 2의 격리 특성  $S_{21}$ 과  $S_{12}$ 는 2.4 GHz에서 각각 -26.5 dB와 -26.6 dB로 관찰되었다. 그런데, 한 가지 주목해야 할 사실은 본 논문의 능동형 90° 전력 결합기는 능동 소자를 이용하였으므로,  $S_{21} \neq S_{12}$ 이며, 따라서, 수동 소자와는 달리  $S_{21}$ 과  $S_{12}$  양쪽 모두에 대한 격리 특성이 요구된다.

그림 6은 각각의 입력 및 출력 포트의 반사계수 특성을 보여주고 있다. 2.4 GHz에서 입력 포트 1의 반사계수 특성인  $S_{11}$ 은 -10.7 dB이고, 입력 포트 2

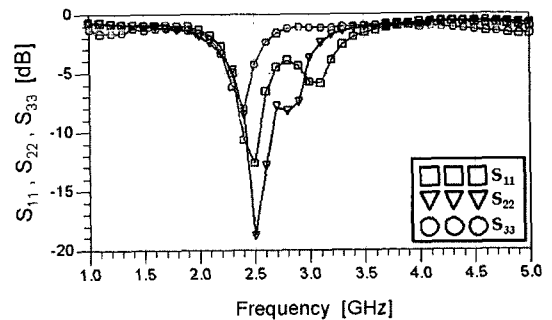


그림 6. 입·출력 반사계수 특성에 대한 측정 결과  
Fig. 6. Measured results for in·output reflection coefficient characteristics.

의 반사계수 특성인  $S_{22}$ 는 -8.5 dB를 보여주고 있다. 출력 포트 3의 반사계수 특성인  $S_{33}$ 은 -8.0 dB를 보여주고 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 MMIC 상에서 집적이 가능한 초소형화된 능동형 90° 전력 결합기를 제안하였으며, 공통-이미터 회로와 공통-컬렉터 회로를 결합한 형태의 회로 구조를 이용하여, 90° 위상차 및 동전력 결합 특성을 가지도록 설계하였다. 그 결과 기존의 수동형 90° 전력 결합기에 비해서 그 크기가 대폭 줄었으며, 제작된 능동형 90° 전력 결합기의 크기는 후단의 증폭기를 포함하여 2.42×1.05 mm이며, 이는 동일한 조건에서, 기존의 수동형 90° 전력 결합기인 브랜치 라인 커플러 크기와 비교해서 약 2.2% 정도의 크기를 가졌다. 능동형 90° 전력 결합기는 기존의 수동

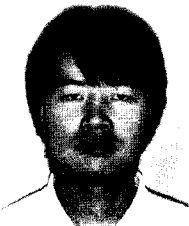
형 90° 전력 결합기와는 달리 2.4 GHz에서 약 10 dB의 출력 이득 특성이 관찰되었고, -92.6°의 양호한 위상차 결합 특성과 -26 dB 정도의 양호한 격리 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문은 능동형 90° 전력 결합기에 대한 최초의 보고이다.

### 참 고 문 헌

[1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, pp. 455-473, 1990.  
 [2] 윤영, RF 능동회로 설계 이론 및 실무, 홍릉과학출판사, pp. 236-239, 265-268, 2005년.  
 [3] T. Hirota, A. Minakawa, and M. Masahiro, "Reduced-size branch-line and rat-race hybrids for uniplanar MMIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory*

*and Tech.*, vol. 38, no. 3, pp. 270-275, Mar. 1991.  
 [4] D. R. Webster, G. Ataei, and D. G. Haigh, "Low-distortion MMIC power amplifier using a new form of derivative superposition", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 2, pp. 328-332, Feb. 2001.  
 [5] Y. Yun, T. Fukuda, T. Kuniyoshi, and O. Ishikawa, "A high performance downconverter MMIC for DBS application", *IEICE Trans Electron.*, vol. E84-C, no. 11, pp. 1679-1688, Nov. 2001.  
 [6] A. S. Sedra, K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, Oxford University Press, pp. 508-533, 2004.  
 [7] R. C. Dorf, J. A. Svoboda, *Electric Circuits*, John Wiley & Son, Reading, 2005.

### 박 영 배



2005년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2007년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 집적회로

### 윤 영



1993년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
 1999년 3월: 일본 오사카대학교 전기공학과 (공학박사)  
 1999년 4월~2003년 9월: 마쯔시마 전기 반도체 디바이스 연구센터 MMIC/RFIC 연구그룹  
 2003년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 조교수  
 [주 관심분야] 무선 통신용 MMIC/RFIC 등