

도파관 내에서 공간적으로 결합된 V-Band MMIC 결합 발진기 Array

Spatially Combined V-Band MMIC Coupled Oscillator Array in Waveguide

최우열 · 김홍득 · 강경태* · 임정화 · 권영우

Woo-Yeol Choi · Hong-Teuk Kim · Kyung-Teh Kang* · Jung-Hwa Yim · Young-Woo Kwon

요 약

본 논문은 V-band에서 동작하는 MMIC 결합 발진기 array에 관한 것이다. 제안된 발진기 array의 unit cell들은 한 개의 microstrip patch 안테나와 두개의 발진기가 결합된 push-pull 능동 안테나 구조로 되어 있다. 전체 발진기 array의 주파수 동기화는 각 unit cell의 microstrip patch 안테나 사이의 강한 전자기적 결합을 통해 이루어진다. 이로 인해 전체 array를 하나의 MMIC로 구현할 수 있었다. 제안된 구조로 설계된 2종의 V-band 1×2 결합 발진기 array가 0.15 um pHEMT MMIC 표준 공정을 이용해 제작되었다. 제작된 MMIC 칩은 도파관을 이용한 전력 결합 module로 구현되었다. 모뎀 측정 결과, 첫 번째 array는 56.372 GHz에서 0.5 dBm의 출력을 나타내었고 다른 하나는 60.147 GHz에서 5.85 dBm의 출력을 나타내었다.

Abstract

In this paper, V-band MMIC coupled oscillator arrays are presented. In the proposed array, two push-pull patch antennas are synchronized by using strong electromagnetic coupling between two antennas. As a result, total size of the array is reduced and the array can be integrated in a single chip. To verify proposed array concept, two 1×2 arrays are designed and fabricated using standard 0.15 um gate length pHEMT MMIC process. The circuits are mounted in an oversized waveguide and measured. The first array shows 0.5 dBm at 56.372 GHz and the second one has an output of 5.85 dBm at 60.147 GHz.

Key words : Coupled Oscillator, Spatial Power Combining, Push-pull Patch Antenna, MMIC, V-band

I. 서 론

밀리미터파 신호원은 밀리미터파 통신 시스템의 필수적인 요소이다. 저가격에 구현이 가능하고 높은 효율을 가진다는 점에서, 반도체 소자 발진기는 밀리미터파 신호원을 구현하는 가장 효과적인 방법이다. 그 중에서도 트랜지스터를 이용한 발진기의 경

우 가장 높은 DC to RF 효율을 가지고 있고, 기술적으로 성숙한 상용 MMIC 공정으로 제작이 가능하므로 높은 재현성과 균일성을 얻을 수 있어, 밀리미터파 대역의 신호원으로 활발하게 연구가 진행되고 있다. 그러나 트랜지스터를 이용한 발진기의 경우 동작 주파수가 높아질수록 주파수의 제공에 비례하여 출력이 감소하기 때문에, 높은 출력을 얻기

「본 논문은 과학기술부의 창의적 연구 진흥 사업 및 서울대학교 3차원 밀리미터파 집적 시스템 센터의 관리로 수행되었습니다. 서울대학교 전기컴퓨터공학부(Division of Electronic and Computer Engineering, Seoul National University)

*(주)웨이브아이스(Wavics, Inc)

· 논문 번호 : 20020525-07S

· 수정완료일자 : 2002년 7월 30일

위해서는 많은 수의 발진기의 출력을 효율적으로 결합하여야 한다. 이를 위하여 발진기에 안테나를 집적하여 발진기형 능동 안테나를 제작하고 이를 array로 만들어 공간적 전력 결합(spatial power combining)을 이루는 방법이 제시되었다^[1]. 그 후 공간적 전력 결합에 관한 많은 연구가 진행되었는데^{[6],[7]} 특히 낮은 주파수 대역(10 GHz 이하)에서는 R. A. York 등의 Watt 급 X-band 결합 발진기 array^[2]를 비롯하여 많은 성공적인 연구 결과들이 보고되었다. 그러나 밀리미터파 대역에서의 결합 발진기에 관한 연구는 거의 보고되지 않고 있다. 그 첫 번째 이유는 주파수가 올라갈수록 하나의 안테나에서 방사되는 출력이 작아져 높은 출력을 얻기 위해서는 array의 element 수가 많아져 시스템의 크기와 복잡도가 증가한다는 것이다. 이에 대한 해결의 실마리는 push-pull 구조의 patch 안테나에서 찾을 수 있다. R. A. York 등에 의해 2개의 Gunn 다이오드 발진기를 하나의 push-pull 안테나에 집적하여 하나의 안테나에서 방사되는 출력이 2배로 증가하는 것이 보고되었으며^[3] T. Itoh 등에 의해 FET 발진기를 집적한 push-pull 능동 안테나와 그를 이용한 array가 보고되었다^[4].

두 번째 이유는 각 array element 간의 동기화에 관한 문제이다. 공간적인 전력 결합을 이루기 위해서는 array를 구성하는 모든 안테나들의 출력이 동기화 되어야 하는데, 발진기의 경우 기준 입력이 없기 때문에 각 안테나간의 적절한 커플링을 통해 동기화를 위해 이루어져야 한다. 이를 위해 외부적인 반투과성 유전체를 이용하여 방사되는 신호를 상호 삽입(mutual injection)하여 동기화 하거나^[1], 각 안테나 사이의 방사 커플링을 이용하거나^[4], 좌장의 정수 배에 해당하는 전송선을 이용하여 발진기를 동기화 시키는 방법^[5]이 제안되었다. 그러나 세 방법 모두 부가적인 구조를 필요로 하거나 면적이 커지게 되어 MMIC 응용에 적당하지 않다.

따라서 본 연구에서는 결합 발진기 array를 MMIC로 구현하기 위해서 push-pull 안테나에 두 개의 발진기를 집적하여 하나의 안테나에서 방사되는 출력을 증가시키고 안테나 사이의 강한 전자기적 커플링을 이용하여 방사되는 신호를 동기화 시키는 방법을 제안하였다. 또한 제안된 구조의 강한 커플

링으로 인해 나타나는 회로의 설계상의 난점을 해결하기 위한 설계 방법을 제시하였다. 마지막으로 제안된 구조와 설계 방법을 검증하기 위해 2종의 결합 발진기 array를 설계하고 측정하였다.

II. 본 론

2-1 동작 원리

Push-pull patch 안테나는 그림 1과 같이 하나의 안테나에 두개의 입력포트를 가지고 있는 구조로 이루어져 있다. 마이크로스트립 패치 안테나는 반파장의 길이로 공진을 이루기 때문에 방사면1($y=d$)과 방사면 2($y=-d$)는 180도의 위상 차이를 가진다. 따라서 각각의 입력포트 1에 +의 신호가 인가되고 반대쪽 입력포트 2에 -신호, 즉 180도 위상 차이를 이루는 신호, 가 인가될 경우 두 신호는 하나의 안테나 위에 동일한 전류 분포를 형성하고 그에 따라 동일한 형태로 안테나를 통해 방사되게 된다. 결과적으로 인가된 두 신호는 하나의 안테나 안에서 합해지게 된다.

결합 발진기 array는 그림 1에 나타난 push-pull 안테나 2개를 100 um 간격으로 배치하여 구성하였다. 이제 두 안테나는 비방사면(non-radiative edge)을 통해 전자기적 커플링을 이루고 그에 따라 이웃하는 두 발진기가 상호 삽입(mutual injection)을 통해 같은 위상으로 동작하게 된다. 결과적으로 두 안테나는 동위상의 신호를 방사하여 공간상에서 결합된다. 이 방법을 통해 기존의 weak coupling을 이용한 방법($3/4 \lambda$)이나 전송선을 이용하는 방법($> \lambda$)에 비해 작은 공간에 하나의 칩으로 array를 구현하는

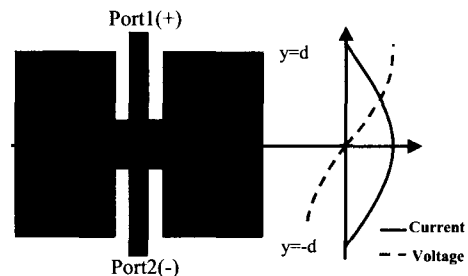


그림 1. Push-pull 마이크로스트립 패치 안테나
Fig. 1. Push-pull microstrip patch antenna.

것이 가능하였다.

2-2 설 계

설계는 크게 EM 시뮬레이터를 이용한 안테나의 설계와 하모닉 밸런스 시뮬레이션을 통한 발진기의 설계로 이루어진다.

안테나 설계에 있어 가장 중요한 점은 제안된 구조의 array는 상호간의 강한 전자기적 커플링으로 인해 안테나의 임피던스가 변한다는 것이다. 따라서 EM 시뮬레이션 과정에서 이런 임피던스의 변화와 커플링을 반영하기 위해 두 안테나를 동시에 4 포트 로 시뮬레이션하였다. 안테나는 100 um의 두께를 가지는 유전율 12.9인 GaAs 기판 위에 Zeland 사의 2.5D EM simulator인 IE3D를 이용하여 설계되었고 GaAs기판의 좋지 않은 loss tangent 특성(>0.0025)으로 인해 대략 50~60%의 방사 효율을 나타내었다. 그 후 설계된 안테나를, 시뮬레이션을 통해 추출된 network parameter를 가지는 수동 소자로 가정하고 하모닉 밸런스 시뮬레이션에 이용하였다.

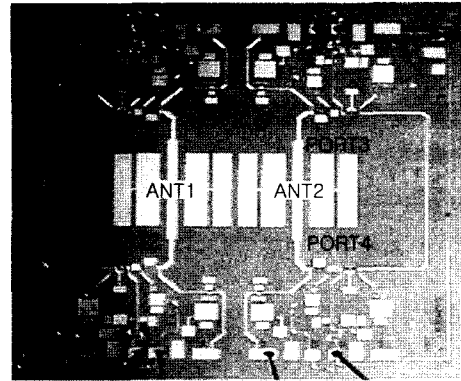
회로적인 관점에서, 제안된 결합 발진기는 4개의 발진기 회로가 4개의 포트를 가지는 수동 회로를 통해 강하게 커플링 되어 있는 구조이다. 이런 구조를 한꺼번에 시뮬레이션할 경우 시뮬레이션에 소요되는 시간이 길어지고 설계 변수가 증가하여 최적화된 발진기를 설계하는 것이 어렵다. 이를 해결하기 위해 안테나에 입력되는 신호의 대칭성을 이용하여 안테나를 하나의 포트를 가지는 등가 회로로 치환하였다. 예를 들어 그림 2 (a)에 나타난 안테나의 포트 1과 포트 3에 +의 신호가 인가되고 포트 2와 포트 4에 -신호가 인가된다면 일반적인 4포트 네트워크는 식 (1)의 과정을 통해 등가적인 1포트 네트워크로 간략화 된다.

$$\begin{bmatrix} b1 \\ b2 \\ b3 \\ b4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S11 & S12 & S13 & S14 \\ S21 & S22 & S23 & S24 \\ S31 & S32 & S33 & S34 \\ S41 & S42 & S43 & S44 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \end{bmatrix}$$

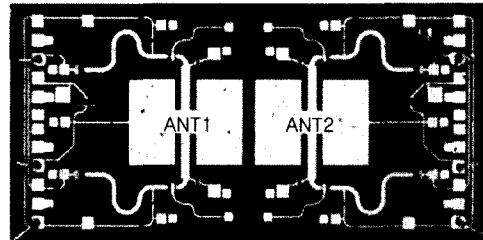
When $b3 = b1, b2 = b4 = -b1,$
 $a3 = a1, a2 = a4 = -a1$ (1)

$$b1 = (S11 - S12 + S13 - S14)a1$$

결과적으로 4개의 결합된 발진기를 설계하는 문



(a)



(b)

그림 2. (a) 제작된 결합 발진기 array 1의 사진
 (b) 제작된 결합 발진기 array 2의 사진

Fig. 2. (a) Photograph of the coupled oscillator array type 1.

(b) Photograph of the coupled oscillator array type 2.

제는 간단한 하나의 직렬 케환 발진기의 설계 문제로 변환된다. 마지막으로, 설계된 직렬 케환 발진기를 4 포트의 안테나에 연결하여 전체 회로에 대한 하모닉 밸런스 시뮬레이션을 수행하여 4개의 발진기가 안테나를 올바르게 push-pull로 동작시키는 위상(포트1과 3은 (+), 포트 2와 4는 (-))을 가지고 있는지를 확인하였다.

위의 설계 방법을 통해 두 가지 다른 발진기 토폴로지를 채용한 1X2 결합 발진기 array를 설계하였다.

Array 1은 각 발진기와 안테나 사이에 buffer amplifier를 채용하여 안테나의 임피던스 변화가 발진기에 영향을 적게 미치도록 하였고 포트 1과 3의 두 발진기의 gate를 180도 위상을 가지는 전송선으

로 연결하여 두 발진기의 출력이 반대의 위상을 가지도록 설계하였다. 설계된 회로는 그림 2(a)에 나타내었고 $3.5 \times 3.5 \text{ mm}^2$ 의 크기를 가지고 있다.

그림 2(b)에 나타난 array 2는 두 개의 발진기를 안테나에 연결하여 안테나를 통해 두 발진기가 180도의 위상 차이를 가지도록 하였다. 각 발진기의 gate단에 shottky 다이오드를 이용한 varactor를 연결하여 주파수 조정 특성을 가지도록 하였다. 설계된 회로의 크기는 $3.8 \times 1.9 \text{ mm}^2$ 이다.

설계된 회로는 0.15 μm 의 gate 길이를 가지는 표준 HEMT MMIC foundry service를 이용하여 제작되었다.

2-3 측정 및 결과

측정을 위한 test module과 package 구조는 그림 3에 나타내었다. 제작된 회로는 그림 3(a)와 같이 test module 위에 마운트 되고 그 module은 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 의 내경을 가지는 oversized 도파관 안에 위

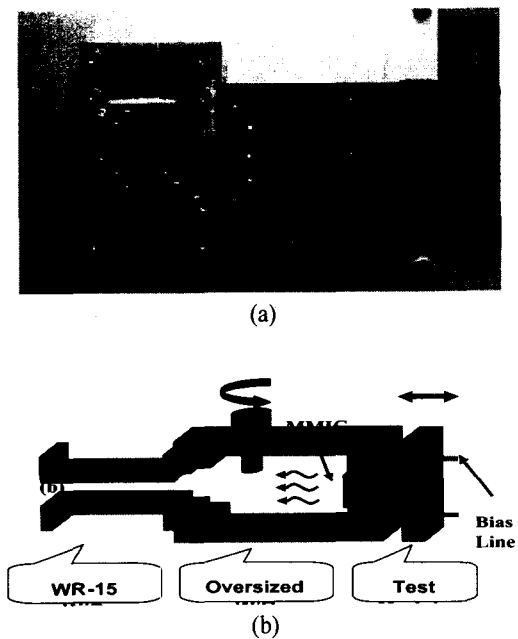


그림 3. (a) 측정을 위해 제작된 test module
 (b) 결합 발진기 array의 측정 구조
 Fig. 3. (a) Photograph of test module.
 (b) Measurement scheme of the coupled oscillator arrays.

치하게 된다. Oversized 도파관은 안테나의 동작을 자유공간에서의와 근접하게 하고 기타 package component를 추가하기 위해 채택하였고, 다단계 임피던스 변환기를 이용하여 회로에서 방사되는 전력을 WR-15 표준 도파관으로 전달한다. Test module의 위치를 조정하여 최대의 출력이 전달될 수 있도록 하였고 도파관의 sidewall에 tuning 나사를 채용하여 도파관의 임피던스를 변환할 수 있도록 하였다.

Array 1의 경우 우선 하나의 안테나에 결합되어 있는 2개의 직렬 귀환 발진기를 $V_g = -0.6 \text{ V}$, $V_d = 3.0 \text{ V}$ 로 구동시켰을 때(ant 1과 ant 2를 하나씩 구동하였을 때) 각각 56.295 GHz와 56.45 GHz에서 -2 dBm 의 출력을 관찰할 수 있었다. 4개의 발진기를 모두 동작시키는 경우 회로는 56.372 GHz에서 0.5 dBm 의 출력을 나타내었다. 출력 신호의 주파수가 각각의 동작 주파수의 중심 주파수로 이동하였고 크기가 2.5 dB 증가하여 각각의 안테나에서 방사된 전력이 도파관 내에서 합쳐지는 것을 확인할 수 있다. 이 실험 결과로부터 두 안테나의 전력 결합 효율은 89.94 %로 계산된다. 그러나 array 1은 array 2에 비해 5 dB 이상의 낮은 출력을 나타내고 있다. 이는 발진기의 주파수가 설계된 주파수(60 GHz)에

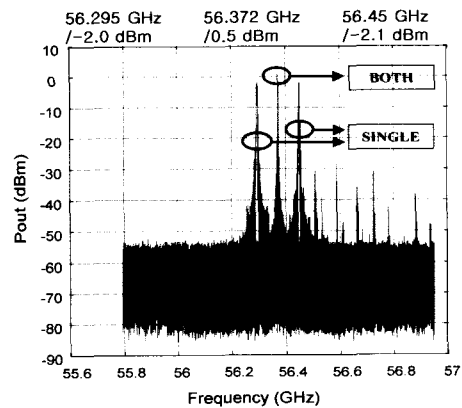


그림 4. Array1의 측정 결과, SINGLE : 1개의 안테나만 구동시, BOTH : 2개의 안테나 모두 구동시

Fig. 4. Measured spectra of the array type 1. The spectra named 'SINGLE' are obtained when only one unit cell is turned on and the spectrum named 'BOTH' is obtained when both cells are turned on.

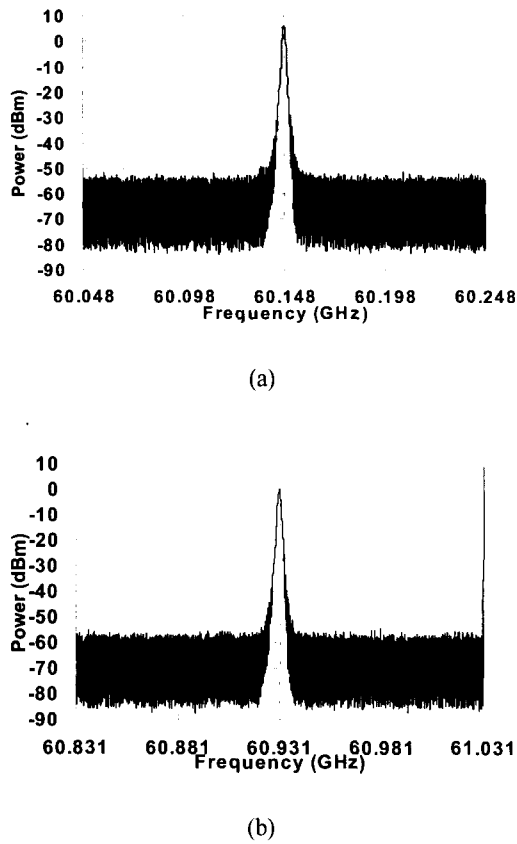


그림 5. (a) Array 2의 두 안테나를 모두 구동할 때의 spectrum(5.85 dBm, 60.147 GHz)
 (b) Array 2의 하나의 안테나를 구동할 때의 spectrum(0 dBm, 60.93 GHz)
 Fig. 5. (a) Measured spectrum when both antennas are turned on(5.85 dBm at 60.147 GHz).
 (b) Measured spectrum when only one antenna is turned on(0 dBm at 60.93 GHz).

비해 4 GHz 가량 낮아지면서 발진기 자체의 출력이 감소하였고 안테나의 방사효율이 60 GHz에서 최대로 설계되어 56 GHz에서 방사효율이 떨어졌기 때문으로 생각된다.

Array 2의 경우 하나의 안테나만을 구동시킬 때 60.93 GHz에서 0 dBm의 출력을 나타내었고 두 안테나를 모두 구동시켰을 때 60.148 GHz에서 5.85 dBm의 출력을 나타내었다(바이어스 조건 : $V_g = -0.3$ V, $V_d = 2$ V). Array 2의 경우 array 1과 달리, 하

나의 안테나 구동한 경우와 두 안테나를 모두 구동한 경우의 주파수가 대략 0.8 GHz 차이가 남을 알 수 있는데 이는 안테나간의 mutual impedance의 변화에 의한 것이다. Array를 이루는 두 안테나는 강한 전자기적 커플링으로 연결되어 있기 때문에 하나의 안테나에 연결된 발진기를 끄게 되는 경우 나머지 안테나의 포트에서 보이는 impedance가 변하게 된다. Array 1의 경우 buffer amplifier로 인해 안테나의 임피던스 변화가 발진기에 영향을 미치지 않지만 array 2의 경우는 안테나의 impedance가 바로 발진기의 부하가 되므로 안테나 impedance가 변하면서 발진 주파수가 변하게 되는 것이다. 그로 인해 array 2에서의 전력 결합의 효율은 산출할 수 없지만, array 전체를 구동하는 경우 단일 안테나 구동시에 비해 높은 수준으로 출력이 증가(5.85 dBm)한 사실을 통해 array 2에서 역시 전력 결합이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 차후 제작된 array의 방사 패턴을 측정하여 안테나 상의 전류 분포를 알아내면 전력 결합이 일어나고 있는지 여부를 정확히 확인할 수 있을 것이다. Array 2의 varactor의 전압 변화에 의한 주파수의 조정 범위는 대략 1 GHz 미만으로 측정되었다. 이는 patch antenna가 상대적으로 큰 Q-값을 가지고 있기 때문으로 생각할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 최초로 V-band에서 동작하는 MMIC 결합 발진기 array를 설계하고 측정하였다. 제안된 회로는 push-pull patch antenna와 강한 커플링 구조를 이용하여 MMIC에 적합한 작은 크기를 구현하였다. 상용의 EM simulator와 circuit simulator를 이용하여 simulation을 수행하였으며, 강한 커플링 상태에서 안테나 구조의 대칭성을 이용해 설계를 간략화 하였다. 제안된 구조와 설계 방법을 통해 2개의 다른 발진기 구조를 채용한 array를 설계하였다. Oversized 도파관을 이용한 module로 제작하여 측정된 결과, 공간적 전력 결합을 통해 비교적 높은 출력을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 차후 large size array를 저 가격과 높은 재현성을 가지는 MMIC로 제작하여 고출력 밀리미터파 신호원으로 응용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. W. Mink, "Quasioptical power combining of solid-state-millimeter-wave sources", *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, pp. 273-279, Feb. 1986.
- [2] P. Liao, R. A. York, "A 1 Watt X-band Power Combining Array Using Coupled VCOs", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1235-1238, June 1994.
- [3] R. A. York, R. C. Compton, "Dual-Device Active Patch Antenna with Improved Radiation Characteristic", *Electronic letters*, vol. 28, no. 11, pp. 1019-1021, May 1992.
- [4] J. Birkeland, T. Itoh, "Spatial Power Combining using Push-Pull FET Oscillators with Microstrip Patch Resonators", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1217-1220, June 1990.
- [5] Jenshan Lin, Tatsuo Itoh, "Two-Dimensional Quasi-Optical Power Combining Array Using Strongly Coupled Oscillators", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. 42, no. 4, April 1994.
- [6] Robert A. York, Zoya B. Popovic, *Active and Quasi-Optical Arrays for Solid-State Power Combining*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1997.
- [7] Julio A. Navarro, Kai Chang, *Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining*, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- [8] 강경태, 임정화, 최우열, 김홍득, 권영우, "웨이브가이드 내부에서 공간적으로 전력 결합된 X-band 발진기 배열", 한국통신학회 하계학술대회 논문집, Aug. 2001.

최 우 열



2001년 2월: 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
 2001년 3월~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정
 [주 관심분야] MMIC 설계 및 측정, 공간적 전력 결합

강 경 태



2000년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2002년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2002년 3월~현재: (주)WAVICS 선임연구원
 [주 관심분야] MMIC 설계, RF MEMS, MMIC 전력 증폭기

김 홍 득



1991년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1993년 3월~현재: LG종합 기술원 선임 연구원
 1998년 3월~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정

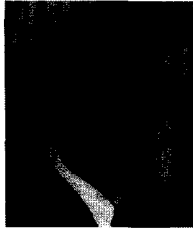
[주 관심분야] MMIC 설계, RF MEMS, 저 위상잡음 발진기

임 정 화



2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2001년 3월~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사과정
 [주 관심분야] MMIC 설계, Microwave cancer detection

권 영 우



1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1990년: University of Michigan(미국) (공학석사)

1994년: University of Michigan(미국) (공학박사)

1996년: Rockwell International Science Center, MTS

1996년~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 조교수

[주 관심분야] MMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템, 능동소자 모델링, RF MEMS