

나선형 공진기를 이용한 고출력 발진기의 설계

구자경¹, 임종식^{1*}, 이준¹, 이재훈¹, 한상민¹, 안달¹
¹순천향대학교

Design of A Power Oscillator Using Spiral Resonator

Jakyung Koo¹, Jongsik Lim^{1*}, Jun Lee¹, Jaehoon Lee¹, Sang-Min Han¹
and Dal Ahn¹

¹Soonchunhyang University

요약 본 논문에서는 나선형 공진기와 고출력 트랜지스터를 이용하여 고출력 발진기를 설계 측정된 결과를 기술하고 있다. 고출력 트랜지스터가 발진기 설계에 단점이 많음에도 불구하고 평면형 공진기 가운데에서 상대적으로 Q가 높다는 장점을 지닌 나선형 공진기가 고출력 발진기 설계에 이용될 수 있음을 보인다. 1.8GHz 주파수 대역에서 고출력 발진기를 설계하여 측정된 결과, 1.74GHz에서 23.5dBm의 출력전력과 1MHz offset에서 -146.76dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 얻었음을 보인다. 또한 바이어스 전압에 따른 발진 주파수와 출력을 측정된 결과, 주파수 천이가 1MHz 이내이고 출력이 최대 24dBm 정도인 특성을 얻었다.

Abstract This paper presents a design of high power oscillator using a spiral resonator and high power transistor with measurement. Even lots of drawbacks are known in design of oscillators using high power transistors, the spiral resonator is adopted because it has relatively high Q out of planar resonators. The designed power oscillator at 1.8GHz is fabricated and tested. Measurement shows the obtained output power is 23.5dBm at 1.74GHz with -146.76dBc/Hz of phase noise at 1MHz offset. In addition, it is illustrated that the frequency stability is excellent with the shift less than 1MHz and the measured maximum output power is around 24dBm when the bias voltages are adjusted.

Key Words : oscillators, spiral resonators, planar oscillators

1. 서론

무선통신시스템에서 마이크로파 발진기는 주파수 변환기, 기준신호 발생기 등의 역할을 하는 중요한 핵심 능동 부품 가운데 하나이다. 고출력 발진 신호를 얻기 위해서 종래에는 그림 1에 보인 것처럼 소신호 트랜지스터를 이용하여 발진기를 설계하여 신호를 얻은 후, 발진된 신호를 고출력 증폭기에 입력하여 원하는 크기로 키우는 과정을 통하여 고출력 발진 신호를 얻는 방법을 많이 사용하였다. 소신호 트랜지스터는 등가회로 모델링이 잘 정립되어 있어서 발진기의 성능 예측 및 비선형 설계가 가능하기 때문이다[1].

고출력 트랜지스터 소자의 경우 등가회로 모델의 정밀

도가 소신호 소자에 비해 훨씬 나쁘기 때문에, 설계과정에서의 정밀성이나 이론적인 정교함이 다소 떨어지기는 해도 꽤나 높은 출력의 발진기를 설계할 수 있다[2-5].

그런데 고출력소자를 이용한 발진기일수록 위상잡음이 증가하는데, 이는 반도체 소자의 고유한 특성 즉, 출력이 클수록 부가잡음 및 위상잡음이 커지는 현상에 기인한다. 고출력 발진기의 위상 잡음을 낮추기 위해서는 Q값이 높은 공동공진기(cavity resonator)를 이용한 발진기가 유리하지만, 공동공진기가 3차원 형상이므로 발진기 회로의 크기가 커지고 평면형 회로(printed circuit board, PCB)으로 제작하는 것이 거의 불가능하다는 단점이 있었다.

이런 문제점을 극복하기 위하여 최근 멤스(micro

*교신저자 : 임종식(jslim@sch.ac.kr)

접수일 10년 08월 10일

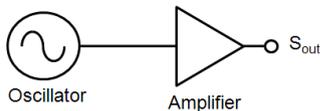
수정일 (1차 10년 09월 10일, 2차 10년 09월 17일)

게재확정일 10년 10월 15일

electro mechanical system, MEMS)형 공동공진기를 이용하여 크기가 작은 발진기를 설계한 결과가 발표된 적이 있다[6]. 그러나 웨임을 바탕으로 제작하는 발진기는 반도체 수준의 정밀한 공정과 제작 기술의 고도성 때문에 가격이 극히 높고, 설계자들이 손쉽게 접근하기가 매우 어렵다는 단점을 가지고 있다.

Q특성에 있어서 3차원 형상의 공진기에는 미치지 못하지만, 종래의 헤어핀 공진기보다 더욱 우수하고 소형화된 평면형 공진기를 응용한 발진기가 몇몇 선형 연구자들에 의해 발표된 적이 있는데, 결합접지구조, 평면형 능동공진기, CPW 구조의 공진기를 이용한 발진기가 해당한다[7-10]. 그러나 이들은 모두 소신호 발진기에 적용되었으며, 20dBm 이상의 고출력 발진기에는 적용된 적이 없다. 고출력 발진기는 공진기의 Q값에 따른 주파수 민감도가 높고, 고출력 트랜지스터의 기생성분이 크고 예측 가능성이 낮아서 등가 모델이 거의 제공되지 않거나 또는 극히 부정확한 점 등 단점이 많아서 크게 주목받지 못한 것이 사실이다.

본 논문에서는 평면형 회로 구조이면서도 비교적 높은 Q값을 지니는 나선형 공진기(spiral resonator)를 이용한 고출력발진기의 설계 및 측정 결과를 제시하고자 한다. 비록 평면형 공진기라는 근본적인 한계점이 있으나, 경제적인 측면을 고려한 저가격의 고출력 발진기를 설계하고자 하는 목적에서 연구가 시도되었다. 설계된 고출력 발진기를 실제로 제작하여 다양한 바이어스 조건에서 성능을 측정하여 그 결과를 함께 제시한다.



[그림 1] 소신호 발진기와 증폭기의 직렬 연결

2. 나선형 공진기의 설계

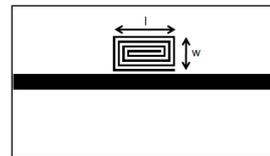
그림 2는 전송선로 주변에 위치하는 평면형 나선형 공진기 구조와 등가회로를 보여주고 있다. 먼저 그림 2(a)는 널리 사용되는 마이크로스트립 전송선로와 그 옆에 존재하는 나선형 공진기 구조를 보여주고 있다. 주어진 PCB 기판에 대하여 전송선로의 선폭, 공진기의 치수(l, w)에 따라서 주파수 특성이 결정된다.

그림 2(b)는 나선형 공진기 선로에 유기되는 전압을 보여준다. 외부에서 시간에 따라 변하는 자계가 공진기에 가해지면 공진기 선로에 전류가 유기된다. 그리고 전류가

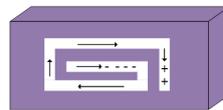
흐르는 선로의 길이만큼 분산 인덕턴스가 발생하고 이어서 선로들 사이의 상호 인덕턴스가 발생하는데, 총 인덕턴스를 L 로 표현하였다. 선로에 유기되는 전류에 의하여 전압이 형성되는 것을 그림 2(b)에 표시하였다.

한편 공진기 선로의 안쪽과 바깥쪽 사이에 분산 커패시턴스(C_d)와 양 끝단에서 가장자리 커패시턴스(C_r, C_r)가 발생한다. 이 두 커패시터는 2단자 회로망에서 신호 전송과 관련되므로 등가적으로 직렬 연결되었다 할 수 있어서, 결과적으로 그림 2(c)와 같은 등가모델이 가능하다.

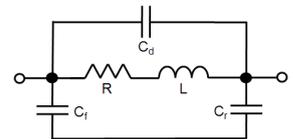
공진기는 특정 주파수의 선택 특성을 가지므로 주파수 변화 특성이 얼마나 급격하게 일어나는지에 따라서 주파수 선택을 의미하는 지표인 Q값이 달라진다. 공진 특성이 급격하게 변화할수록 3dB 대역폭은 좁아지고, 결국 Q값은 커지게 된다. 이것은 회로에서의 대역폭과 관련된 개념으로, Q가 낮으면 대역폭이 넓다는 의미이고 높으면 협대역의 의미를 가진다[11]. 그런데 발진기 응용에 있어서 공진기의 Q는 높을수록 특정 주파수에서의 발진가능성 및 발진주파수 안정성면에서 유리하다.



(a)



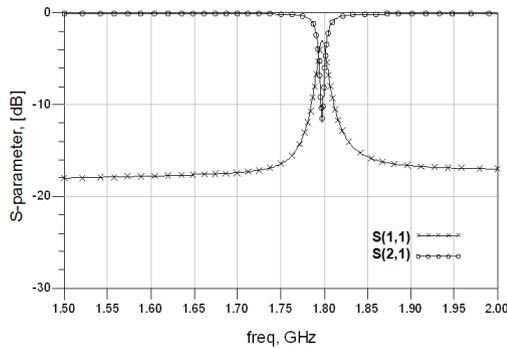
(b)



(c)

[그림 2] 나선형 공진기와 등가회로 (a)전송선로와 공진기 구조 (b) 공진기에서의 전압변화 (c)등가회로

나선형 공진기는 같은 주파수대의 다른 형태의 공진기보다 좁은 면적을 차지하므로 회로의 크기를 대폭 줄일 수 있고 따라서 제작원가가 감소되는 장점이 있다. 나선형 공진기는 구조상 등가적으로 L 과 C 의 직,병렬 회로를 가지면서 동시에 큰 커패시턴스 값을 가지므로 이로 인하여 평면형 구조의 공진기들 가운데 상당히 높은 Q값을 가진다. 상대적으로 높은 Q값은 발진기의 출력 향상에 중요한 영향을 끼치는 요소 중에 하나이다. 더구나 출력의 크기를 극대화하기 위한 고출력 발진기에 있어서 주어진 설계 조건에서 얻을 수 있는 가능한 한 높은 Q값은 출력전력 향상에 중요하다.



[그림 3] 나선형 공진기 특성 (l=6.65mm, w=3.8mm)

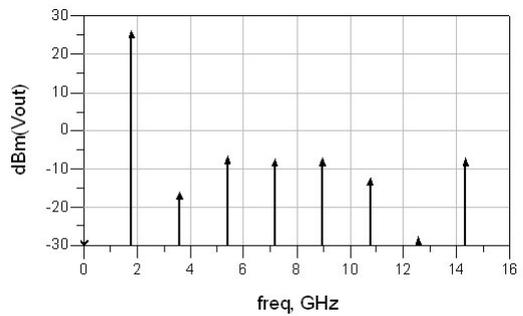
그림 3은 나선형 공진기의 주파수 특성의 예를 보여주고 있다. 그림 2(a)의 구조에 대하여 비유전율이 2.55이고 유전체 두께가 20mils인 기판에 대하여 l과 w가 각각 6.65mm, 3.8mm이고, 나선형 공진기의 선폭과 간격이 각각 0.3mm, 0.2mm인 경우에 전자기적 시뮬레이션 (electromagnetic(EM) simulation)을 통하여 그림 3과 같은 S-파라미터 특성을 얻었다. 공진기의 Q값을 수식 (1)로부터 계산한 결과 160을 얻었다.

$$Q = \frac{f_0}{BW_{3dB}} \quad (1)$$

3. 고풍력 발진기의 설계

앞에서 설계한 나선형 공진기를 이용하여 주파수 1800MHz에서 고풍력 발진기를 설계하였다. 설계에 사용된 유전체 기판은 상기 나선형 공진기에서와 같다. 또한 마이크로파 고풍력 능동 소자로는 NE6510179A 트랜지스터를 이용하였다. 나선형 공진기를 이용하여 해당 주파수에서 부성저항 및 1 미만의 안정도에 의한 발진조건이 성립되도록 하였으며, 이에 적합한 반사계수를 설정하고 정합회로 및 궤환 회로를 설계하였다.

나선형 공진기를 이용한 고풍력 발진기의 설계와 공진기 특성의 EM 시뮬레이션을 위해 Agilent社의 ADS-Momentum을 이용하였다. 먼저 그림 2에 보인 것과 같은 나선형 공진기를 EM 시뮬레이션하여 발진기 회로에 삽입하여 출력 단에서의 정합회로를 설계한 후 시뮬레이션하여 설계의 정확도를 높이도록 하였다.

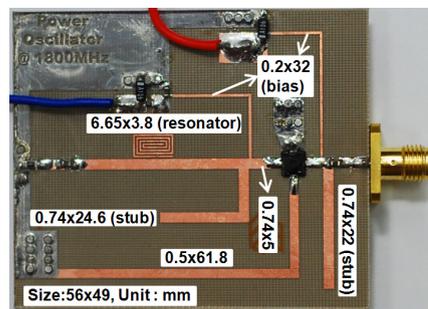


[그림 4] 설계된 고풍력 발진기의 출력과 하모닉 성능

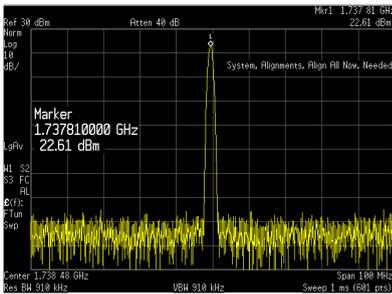
그림 4는 고풍력 발진기의 설계 성능인데, 1.794GHz에서 26.1dBm의 출력을 나타내고 있다. 사용한 트랜지스터가 1Watt급 소자이기는 하지만, loadpull 시뮬레이션에서 얻은 이상적인 최대 출력점과 부성저항의 발진조건을 이루는 실제 정합점이 정확하게 일치하지 않으므로, 고풍력 트랜지스터의 이상적 최대 출력을 고풍력 발진기에서의 최대 출력값으로 가져오기는 극히 어렵다. 따라서 발진이 가능한 정합조건을 찾으면서 26.1dBm의 설계 성능을 얻은 것은 프로토타입 설계에서는 양호한 결과로 판단된다.

4. 제작 및 측정 성능

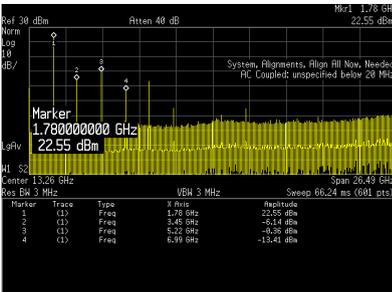
상기와 같이 설계한 고풍력 발진기를 설계하였다. 그림 5는 제작된 고풍력 발진기의 모습이다. 제작된 고풍력 발진기는 56x49mm²의 크기를 갖는다. 실험실 수준의 프로토타입 제작 설비를 이용하여 조립하였으며 가능한 한 시뮬레이션된 회로에 가깝게 구현되도록 하였다.



[그림 5] 고풍력 발진기의 제작 사진



[그림 6] 고출력 발진기의 측정된 출력 스펙트럼

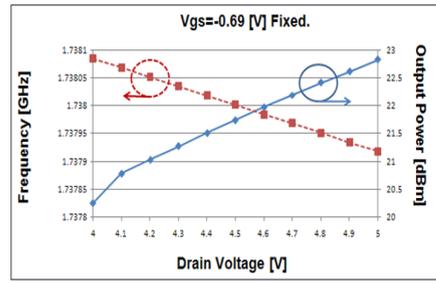


[그림 7] 고출력 발진기의 측정된 하모닉 스펙트럼

그림 6~그림 8은 제작한 고출력 발진기에 대하여 Agilent E4440A 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정한 성능을 보여주고 있다. $V_{gs}=-0.69V$, $V_{ds}=4.9V$, $I_{ds}=355mA$ 의 바이어스 조건에서 측정한 결과, 그림 6처럼 1.74GHz에서 22.61dBm의 출력을 나타냈는데, 측정셋업(setup)에 필요한 출력측 컨넥터와 일 정 길이의 RF 케이블에 의한 손실(약 1dB 정도)이 보상되어 있지 않으므로 실제로는 최소 23.5dBm 정도의 출력값을 지나는 것으로 판단된다. 측정된 하모닉 주파수 성분이 그림 7에 제시되어 있다. 측정결과 2차 하모닉은 -6dBm 근처였으며 기본주파수(fundamental) 성분 대비 약 28dBc의 차이를 보였다. 그림 8은 위상잡음인데 -146.76dBc/Hz@1MHz offset의 측정 결과를 보였다.



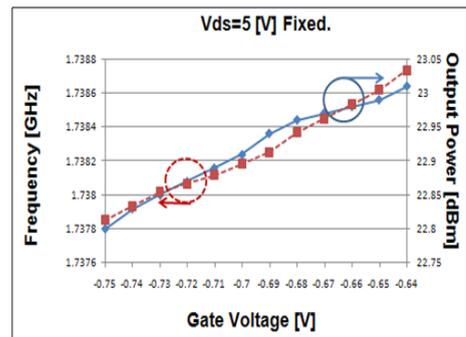
[그림 8] 고출력 발진기의 측정된 위상 잡음



[그림 9] V_{gs} 를 고정하고 V_{ds} 를 변화시킨 상태에서의 발진 주파수와 출력성능

그림 9와 그림 10은 가변되는 바이어스 조건에 따른 발진주파수의 안정성과 출력전력을 측정된 결과를 보여준다. 먼저 그림 9는 V_{gs} 를 -0.69V로 고정한 후 V_{ds} 를 4V에서 5V까지 0.1V 단위로 변화시켰을 때의 측정결과 그래프이다.(이 때 I_{ds} 는 273mA~363mA의 변화를 보임.) 바이어스를 가변해도 발진주파수는 0.17MHz가 변하는데 그쳐 주파수 안정성이 우수하게 측정되었다. 이 때 발진 출력은 20.25~22.8dBm까지 변하였으며, 여기에 출력측 컨넥터와 RF 케이블의 손실을 보상해 주면 약 21~23.8dBm 정도의 출력전력을 예상할 수 있다.

그림 10은 V_{ds} 를 5V로 고정한 후 V_{gs} 를 -0.75V에 -0.64V까지 0.01V 간격으로 변화시켰을 때의 측정결과 그래프이다.(이 때 I_{ds} 는 346mA~379mA의 변화를 보임.) 이 때 발진주파수는 0.9MHz가 변하는데 그쳐 역시 주파수 안정성이 우수하였다. 이 때 발진 출력은 22.8~23.01dBm까지 변하였으며, 여기에 출력측 컨넥터와 RF 케이블의 손실을 보상해 주면 약 23.8~24dBm 정도의 출력전력이 생성됨을 예상할 수 있다.



[그림 10] V_{ds} 를 고정하고 V_{gs} 를 변화시킨 상태에서의 발진 주파수와 출력성능

표 1은 고출력 발진기의 설계 및 측정 결과를 비교하여 그린 표이고, 표 2는 몇 가지의 선행연구와 본 논문에서의 고출력발진기의 성능을 비교하여 보여주고 있다. 각

연구마다 사용한 트랜지스터의 종류, 바이어스 전압, 공진기 형태가 달라서 직접적인 비교는 어렵다. 하지만 본 논문에서 사용한 트랜지스터의 최대출력의 크기와 바이어스 전압이 상대적으로 낮음을 고려해 볼 때, 현재의 결과는 고무적인 결과이며, 추가적인 연구를 통하여 성능 개선의 여지가 아직도 많이 남아 있음을 알 수 있다.

또한 3차원 공진기를 사용한 [3]과 비교할 때, 평면 구조의 나선형 공진기를 사용한 본 논문에서의 위상잡음이 대등하게 측정되어, 평면형 공진기를 이용한 경우에도 위상잡음을 충분히 낮출 수 있음이 확인되고 있다. 그리고 그림 8처럼 측정된 10kHz와 100kHz offset에서의 위상잡음을 표1에 정리해 본 결과, [4],[5]보다도 우수한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

【표 1】 발진 주파수와 출력의 설계 및 측정 비교

항목	단위	규격	설계	측정
주파수	GHz	1.8	1.794	1.74
출력의 크기	dBm	25 이상	26.1	24
위상잡음	dBc/Hz @ 1MHz offset	130 이하	N/A	-146.76

【표 2】 고출력 발진기의 측정 결과 비교

	TR Device	TR의 최대출력 [W]	Bias 전압 [V]	발진 주파수 [GHz]	발진 출력 [dBm]	위상잡음과 (공진회로 type)
[3]	LDMOS	10~30	30	2.46	34.5	-147dBc/Hz @ 1MHz offset (rect. cavity)
[4]	NPN BJT	0.5	12.5	0.75	26.2	-85dBc/Hz @ 10kHz offset (LC 피드백)
[5]	GaN	5~10	28	1.63	32	-81.4dBc/Hz @ 100kHz offset (LC 피드백)
본 논문	GaAs FET	1	5	1.74	24	-146.76dBc/Hz @ 1MHz offset -118dBc/Hz @ 100kHz offset -107dBc/Hz @ 10kHz offset (평면 나선형 공진기)

5. 결론

본 논문에서는 평면형 구조에서는 상대적으로 Q가 높은 나선형 공진기와 NE6510179A 트랜지스터를 사용한

고출력 발진기의 설계 및 측정 결과에 대하여 논하였다. 고출력 트랜지스터 소자의 등가모델이 주어지지 않은 상태에서 설계상의 어려움을 극복하고자 나선형 공진기를 먼저 설계하고, 이를 고출력 발진기 설계에 적용하였다. 1.8GHz에서 설계된 발진기는 실제로 측정결과 1.74GHz에서 22.61dBm의 출력을 보였는데, 측정시 연결한 출력 측 컨넥터, DC block, RF 케이블에서의 손실을 보상하면 약 23.5dBm의 실제 출력을 보였다고 판단된다. 측정된 위상잡음은 1MHz offset 조건에서 -146.76dBc/Hz으로 우수한 성능을 보였다. 또한 바이어스 조건의 변화에 따른 발진 주파수와 출력을 측정한 결과 바이어스 조건이 약간 변해도 주파수 안정성은 1MHz 내외로 극히 안정하였으며, 약 24dBm까지의 출력 특성을 보였다.

본 논문에서 제작한 고출력 발진기는 실험실 수준의 프로토타입이지만, 추가적인 연구를 통한 설계의 보강과 제작 및 측정의 고도화를 통하여 보다 개선된 성능을 고출력 발진기를 향후 기대할 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] M. Q. Lee, S. J. Yi, S. Nam, Y. Kwon, and K. W. Yeom, "High-Efficiency Harmonic Loaded Oscillator with Low Bias Using a Nonlinear Design Approach," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, No. 9, pp. 1670-1679, Sep. 1999.
- [2] A. Gitsevich, D. Kirkpatrick, and L. Dymond, "Solid-state High Power RF Oscillator," *IEEE Int. MTT Symposium Digest*, vol. 3, pp. 1423-1426, May 2001.
- [3] Woong-Jae Hwang, Suk-Woo Shin, Gil-Wong Choi, Hyoung-Jong Kim, Jin-Joo Choi, "2.46GHz solid-state high-power oscillator with planar cavity resonator," *Microwave Conference, 2008. APMC 2008.*, pp. 1-4, Dec. 2008.
- [4] W.H. Chan, C.N. Wong, K.F. Tsang, and S.K. Kwok, "An Optimum Design of Class-C Power Oscillator using Large-Signal S-parameters," *Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp.593-597, Canada, May 1999.
- [5] A. Victor, J. Nath, D. Ghosh, S. Aygun, W. Nagy, J.-P. Maria, A.I. Kingon, and M.B. Steer, "Voltage Controlled GaN-on-Si HFET Power Oscillator Using Thin-Film Ferroelectric Varactor Tuning," *Proceedings of the 36th EUMC*, pp. 87~ 90, U.K., Sep. 2006.
- [6] J. Papapolymerou, J. C. Cheng, J. East, and L. P. B. Katehi, "A micromachined high-Q X-band resonator,"

IEEE Microwave Guided Wave Lett., Vol. 7, No. 6, pp. 168-170, Jun. 1997.

- [7] Y. T. Lee, J. S. Lim, C. S. Kim, D. Ahn, and S. Nam, "A Compact-Size Microstrip Spiral Resonator and Its Application to Microwave Oscillator," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 12, No. 10, pp. 375-377, 2002.
- [8] Y. T. Lee, J. S. Lim, J. S. Park, D. Ahn, and S. Nam, "A Novel Phase Noise Reduction Technique in Oscillator Using Defected Ground Structure," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 39-41, Feb. 2002.
- [9] Y. T. Lee, J. S. Lim, S. Kim, J. Lee, S. Nam, K. S. Seo, and D. Ahn, "Application of CPW Based Spiral-Shaped Defected Ground Structure to The Reduction of Phase Noise in V-Band MMIC Oscillator," *2003 IEEE MTT-S Digest*, vol. 3, pp. 2253-2256.
- [10] 구자경, 임종식, 한상민, 안달, "나선형 공진기를 이용한 CPW 발진기 설계", 한국산학기술학회논문지, 제 10 권 제 10호, pp. 2639~2645, 2009년 10월.
- [11] J. Lee, Y. T. Lee, and S. Nam, "A Phase Noise Reduction Technique in Microwave Oscillator Using High-Q Active Filter," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 12, No. 11, pp. 426-428, 2002.

구 자 경(Jakyung Koo)

[준회원]



- 2008년 2월 : 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)
- 2010년 2월 : 순천향대학교 대학원 전기통신시스템공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 ~ 현재 : (주)브로던 재직중

<관심분야>

초고주파 무선 능동/수동 회로/부품 설계 분야 등

임 종 식(Jongsik Lim)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 서강대 전자공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 서강대 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 2005년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기통신공학과 재직중

<관심분야>

초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및 회로 응용 등

이 준(Jun Lee)

[준회원]



- 2010년 2월 : 순천향대 정보기술공학부 (공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 순천향대 대학원 전기통신시스템공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

초고주파 무선 능동/수동 회로/부품 설계 분야 등

이 재 훈(Jaehoon Lee)

[준회원]



- 2010년 2월 : 순천향대 정보기술공학부 (공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 순천향대 대학원 전기통신시스템공학과 석사과정 재학중

<관심분야>

초고주파 무선 능동/수동 회로/부품 설계 분야 등

한 상 민(Sang-Min Han)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대 전파공학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 고려대 대학원 전 파공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 고려대 대학원 전 파공학과 (공학박사)
- 2003년 10월 ~ 2004년 11월 : UCLA Post Doctoral Research Fellow
- 2005년 1월 ~ 2007년 8월 : 삼성종합기술원 전임연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 재직중

<관심분야>

RF시스템, Low Power RF Transceiver, Active Integrated Antenna Systems 등

안 달(Dal Ahn)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서강대 전자공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 서강대 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1990년 8월 : 서강대 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1990년 8월 ~ 1992년 8월 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 1992년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기통신공학과 재직중

<관심분야>

RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계 등