
LTCC를 이용한 push-push 유전체 공진 발진기의 설계 및 제작

류근관* · 오일덕* · 김성찬**

Design and Fabrication of the Push-push Dielectric Resonator Oscillator
using a LTCC

Keun-Kwan Ryu* · Eel-Deok Oh* · Sung-Chan Kim**

이 논문은 2008년도 국립한밭대학교 연구비를 지원받았음

요 약

LTCC(low temperature co-fired ceramic) 공정의 다층기판을 이용하여 push-push 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. 중심주파수 8GHz를 갖는 직렬 케환형의 단일 유전체 공진 발진기를 설계하고 이를 이용하여 중심주파수 16GHz인 push-push 유전체 공진 발진기를 설계하였다. 발진기의 회로 크기에 큰 영향을 미치는 바이어스 회로를 LTCC 다층구조의 중간층에 배치함으로써 일반적인 단층기판을 이용한 경우에 비해 발진기 회로의 크기를 크게 줄일 수 있었다. 제작된 push-push 유전체 공진 발진기의 측정결과 기본 주파수 및 3차 고조파 억압특성은 각각 15dBc 및 25dBc 이상의 특성을 나타내었으며 발진기의 위상잡음 특성은 $-102\text{dBc/Hz}@100\text{KHz}$ 및 $-128\text{dBc/Hz}@1\text{MHz}$ 의 특성을 각각 나타내었다.

ABSTRACT

The push-push DRO(dielectric resonator oscillator) using a multi-layer structure of LTCC(low temperature co-fired ceramic) fabrication is designed. After the single DRO of series feedback type in the center frequency of 8GHz is designed, the push-push DRO in the center frequency of 16GHz including the Wilkinson power combiner is designed. The bias circuit affecting the size of oscillator are embedded in the intermediate layer of the LTCC multi-layer substrate. As a result, the large reduction in the size of VCO is obtained compared to the general oscillator on the single layer substrate. Experimental results show that the fundamental and third harmonics suppression are above 15dBc and 25dBc, respectively, and phase noise characteristics of the push-push DRO presents performance of $-102\text{dBc/Hz}@100\text{KHz}$ and $-128\text{dBc/Hz}@1\text{MHz}$ offset frequencies from carrier.

키워드

유전체 공진 발진기, 전압제어발진기, push-pull, LTCC

Key word

DRO, VCO, Push-push, LTCC

* 국립한밭대학교 전자공학과
** 국립한밭대학교 전자공학과 (교신저자)

접수일자 : 2010. 01. 12
심사완료일자 : 2010. 02. 01

I. 서 론

마이크로웨이브 회로 설계 기술은 상업용 무선통신 기술의 발전과 더불어 급격히 발전하고 있으며 주로 회로의 소형화, 집적화, 경량화를 추구하고 있다. 또한, 무선통신 시스템에서 사용되는 신호원은 전체 시스템의 안정성에 가장 큰 영향을 미치므로 매우 중요한 부품으로 여겨지고 있으며 위상잡음 특성 및 신뢰성이 주요 관건이 된다. 사용 주파수도 Ku-band (12-14 GHz) 및 Ka-band (26.5-40GHz)로 확대되고 있으며 고신뢰도, 고안정도, 저위상잡음 및 저가격이 요구되고 있다.

3차원 집적화가 가능한 LTCC 기술은 마이크로파 회로의 크기 및 가격을 감소시키는데 적합한 기술이며, 동시에 낮은 유전체 loss tangent는 높은 주파수에서의 회로 성능 특성을 보장한다. 그러므로 다양한 기판 기술에서 LTCC의 이와 같은 뛰어난 장점 때문에 마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 동작 가능한 회로들의 설계 연구가 꾸준히 지속되고 있다[1-2].

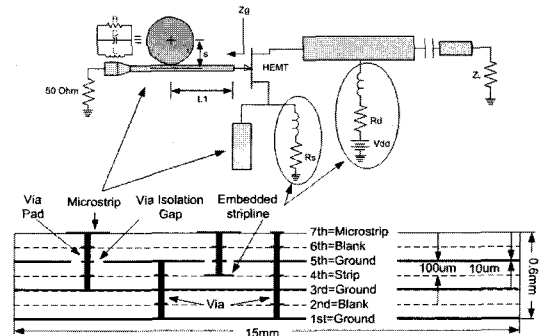
유전체 공진기(DR, dielectric resonator)는 마이크로 스트립 공진기나 도파관 공진기에 비해 높은 양호도와 작은 칩 사이즈의 장점을 지니고 있다. 그리고 유전체 공진기를 이용한 유전체 공진 발진기(DRO, dielectric resonator oscillator)는 마이크로파 또는 밀리미터파 영역에서 높은 안정도 및 낮은 위상잡음의 신호원을 얻기 위한 효과적인 방법이다[3]. 일반적으로 시스템의 요구조건을 만족시키기 위하여 높은 안정도 특성을 갖는 신호원은 주로 위상고정 방식을 사용해 왔다[4]. 이러한 위상고정 신호원을 위해서는 전압제어 발진기(VCO, voltage controlled oscillator)가 필수적이거나 push-push 구조의 전압제어 발진기의 경우 주파수 동조 회로를 실현하기는 어려움이 따른다. Push-push 구조의 발진기 이론은 다양한 논문 [5-6]에서 이미 설명된 바 있다.

따라서 본 논문에서는 LTCC 기술의 장점인 3차원의 구조적인 장점을 이용함으로써 push-push 유전체 공진 발진기의 크기를 크게 줄이고 결합구조의 마이크로 스트립라인을 이용한 주파수 동조회로를 push-push 유전체 공진 발진기에 적용하여 마이크로파 신호원을 설계 및 제작하였다.

II. LTCC 유전체 공진 발진기의 설계

유전체 공진 발진기에서 가장 널리 사용되고 있는 구조는 HEMT의 소스 단자에 연결되어 있는 저항으로 자기바이어스 방식을 사용하는 직렬케환형 구조이다. 직렬 케환형 구조는 부하에 따른 발진 주파수의 변동이 적고 회로가 간단하여 구현하기에 적합한 장점이 있다. 본 논문에서는 유전체 공진 발진기의 능동소자로서 Fujitsu에서 제공하는 FHX35X chip HEMT를 사용하였다. 또한 6개의 유전체 층을 갖고 있는 Ferro A6 기판의 LTCC 공정을 이용하여 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. Ferro A6는 유전율 5.9, loss tangent 0.0013, 유전체 두께 100 μ m 및 금속 두께 10 μ m(max)의 제원을 가지고 있다.

그림 1은 LTCC 구조의 유전체 공진 발진기의 구조를 보여주고 있다. 첫 번째, 세 번째 및 다섯 번째의 금속 층은 접지(ground)로 사용되었다. 또한, HEMT 소자의 드레인(drain)과 소스(source) 바이어스 회로는 네 번째의 금속 층에 삽입하였다. 그리고 게이트(gate) 단자에서 유전체 공진기와 결합하는 마이크로스트립 라인, 소스 단자에서 정궤환용 마이크로스트립 라인 및 드레인 정합 회로(matching circuit)는 일곱 번째 금속 층에 위치하여 설계하였다. 두 번째와 및 여섯 번째 금속 층은 LTCC 공정상 마이크로스트립 라인의 최소 선폭 및 선간 간격(gap)을 고려하여 빈(blank) 층으로 활용하였다.



* 유전체 공진기(DR) 정보 (part number : DRO077B0034, muRata)
 (1) 비유전율 : 27.9 (2) Unloaded Q : 15,000 min @10GHz
 (3) 크기 : 지름-7.69mm, 두께-3.41mm (4) Frequency range : 7.97-8.67GHz

그림 1. LTCC 유전체 공진 발진기의 구조
 Figure 1. Configuration of the LTCC DRO

고임피던스 전송라인을 구현하기 위해서는 100 μ m 이상의 유전체 층이 요구되기 때문이다.

그림 1에 마이크로스트립 라인과 결합한 유전체 공진기의 등가회로 및 능동소자를 포함한 발전기 회로를 나타내었다. 그림 1에서 Z_g 는 HEMT의 게이트 단자에서 바라본 등가회로의 임피던스를 나타낸다. L1의 길이가 공진 주파수의 파장에 대해 약 1/4일 때 임피던스 Z_g 의 궤적을 살펴볼 때 리액턴스(X_g) 변화가 급격하고 레지스턴스(R_g) 크기가 작기 때문에 낮은 위상잡음을 갖는 발전기의 구현이 가능하다. 이와 같이 유전체 공진기와 결합한 마이크로스트립 라인의 전기적 길이가 90°일 때 임피던스 인버터(impedance inverter)로 동작한다. 따라서 임피던스 인버터는 병렬 공진회로의 등가회로를 직렬 공진회로로 변환하게 된다. 높은 특성임피던스의 임피던스 인버터와 결합한 유전체 공진회로의 리액턴스 변화 기울기는 낮은 특성임피던스의 임피던스 인버터와 결합한 유전체 공진회로의 리액턴스 변화 기울기보다 급격하다. 이는 고임피던스의 임피던스 인버터를 이용할 경우 발전기의 위상잡음 특성이 향상될 수 있음을 의미한다[7].

III. LTCC push-push 전압제어 유전체 공진 발전기의 설계

그림 2는 push-push 전압제어 유전체 공진 발전기(VCDRO, voltage controlled dielectric resonator oscillator)의 구조를 보여주고 있다. 직렬 케환형 구조의 단일 발전기는 특히 TE016 모드로 동작하는 유전체 공진기를 이용하는 push-push 발전기의 구현에 매우 적합하다. 따라서 본 논문에서는 push-push 전압제어 유전체 공진기를 설계하기 위해 두 개의 직렬 케환형 발전기, 2차 고조파(2fo)의 전력 결합기 및 두 개의 주파수 동조회로를 이용하였다.

그림 2와 같이 유전체 공진기는 병렬 마이크로스트립 라인 사이에 위치하여 OSC1과 OSC2의 임피던스 인버터와 각각 동시에 결합된다. 기본 주파수의 경우 OSC1에서 HEMT의 게이트 전류는 OSC2에서 HEMT의 게이트 전류와 정반대의 위상, 즉 180°의 위상차를 갖는다. 그러나 2차 고조파의 경우 두 게이트 전류는 동위상, 즉

0°의 위상차를 갖게 된다. 완벽한 대칭구조인 OSC1과 OSC2의 신호는 다음과 같이 식(1) 및 식(2)로 각각 나타낼 수 있다.

$$S_{OSC1}(t) = a_1 e^{j\omega t} + a_2 e^{j2\omega t} + a_3 e^{j3\omega t} + \dots \quad (1)$$

$$S_{OSC2}(t) = a_1 e^{j\omega(t-\pi)} + a_2 e^{j2\omega(t-\pi)} + a_3 e^{j3\omega(t-\pi)} + \dots \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서 π 의 위상차를 제외하고는 두 개의 신호는 이상적으로 크기 및 주파수가 동일하다. 그러므로 push-push 발전기의 출력 신호는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{out}(t) = 2a_2 e^{j2\omega t} + 2a_4 e^{j4\omega t} + 2a_6 e^{j6\omega t} + \dots \quad (3)$$

완벽하게 대칭구조인 OSC1과 OSC2의 경우 push-push 발전기는 식(3)과 같이 짝모드(even mode) 신호만을 제공한다.

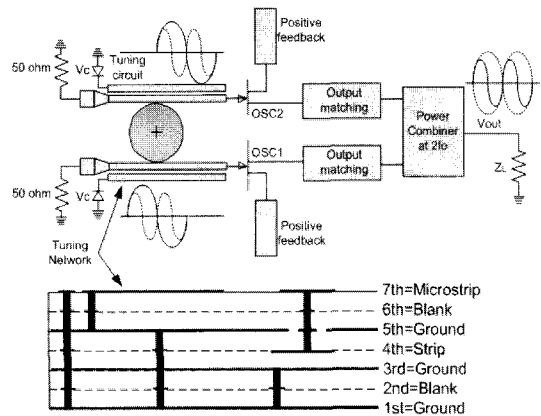


그림 2. 결합라인의 주파수 동조회로를 갖는 LTCC push-push 전압제어 유전체 공진 발전기의 구조

Figure 2. Configuration of the LTCC push-push VCDRO with coupled line frequency tuning circuit

그림 2는 버랙터 다이오드(varactor diode)를 이용한 주파수 동조회로를 보여주고 있다. 일반적으로 평면형 push-push 발전기에 주파수 동조회로를 삽입하는 것에 는 어려움이 있다. 본 논문에서는 공진 주파수의 동조

를 위해 유전체 공진기와 결합하는 임피던스 인버터를 결합라인 구조로 설계하여 주파수 동조회로를 구현하였다. 능동소자의 게이트 단자에 연결된 결합라인의 임피던스 인버터에 버랙터 다이오드를 삽입하고 버랙터 다이오드의 제어전압을 위한 바이어스 회로는 LTCC 다층 공정기술의 장점을 이용하여 네 번째 층(strip layer)에 삽입하였다. 주파수 동조를 위한 전송선로는 중심주파수의 반파장의 길이를 갖고 있으며 유전체 공진기는 전송선로의 중간에 위치시켜 최대 자체 결합이 발생하도록 하였다.

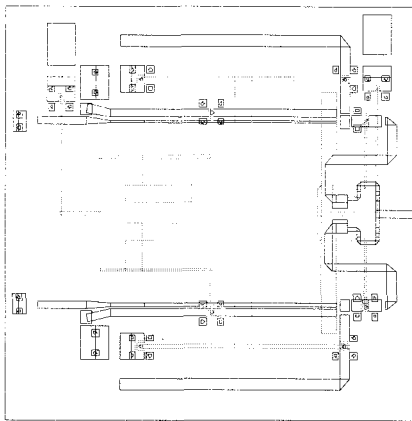


그림 3. 다층구조를 갖는 Push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 레이아웃
Figure 3. Layout of the push-push VCDRO with multi layers

그림 3은 다층구조의 LTCC 공정을 이용한 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기의 레이아웃이다. 회로의 크기는 15mm × 15mm로서 일반적인 단층구조의 회로 설계에 비해 약 40% 이상의 회로 크기 감소효과를 기대할 수 있다.

IV. 측정 및 고찰

LTCC 공정을 기반으로 제작된 push-push 전압제어 유전체 공진 발진기는 16GHz 근처에서 발진 주파수를 갖고 있으며 유전체 공진기는 트랜지스터의 게이트 단자로부터 약 1/4파장 길이만큼 떨어진 위치에 고정시켰

다. 출력 스펙트럼 및 위상잡음 특성은 Agilent사의 8565E 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정되었다.

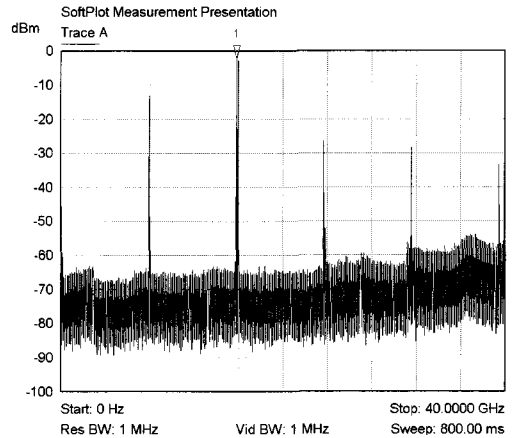


그림 4. Push-push 유전체 공진 발진기의 고조파 억압특성
Figure 4. Harmonic suppression characteristics of the push-push DRO

그림 4는 8565E 스펙트럼 분석기의 전체 span에서 측정된 스펙트럼이다. 기본 주파수 및 3차 고조파는 약 15dBc 및 25dBc의 억압특성을 각각 나타내었다. 기본주파수의 억압특성은 유전체 공진기의 위치에 따라 개선의 여지가 있으나 발진기의 다른 특성과 trade-off 관계에 있다.

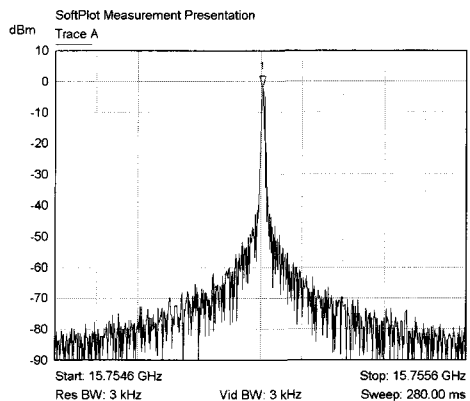


그림 5. Push-push 유전체 공진 발진기의 출력
Figure 5. Output power of the push-push DRO

그림 5는 약 2.0dB의 케이블 손실을 포함하여 -2.13dBm의 출력 전력을 나타내고 있다. Free running 상태에서 중심 주파수는 목표 주파수에 비해 약간 낮게 측정되었으나 유전체 공진기의 동조나사 등을 이용하여 미세조정하면 16GHz에 정확하게 맞추는 것이 가능하다. 제작된 push-push 유전체 공진 발진기는 중심 주파수로부터 10KHz, 100KHz 및 1MHz의 떨어진 주파수에서 각각 -74dBc/Hz, -102dBc/Hz 및 -128dBc/Hz의 위상잡음 특성을 나타내고 있으며 이를 그림 6에 나타내었다. 능동소자로서 사용된 HEMT를 대신하여 플리커 잡음(flicker noise)이 비교적 낮은 MESFET 및 HBT 등을 사용하면 위상잡음 특성이 더욱 향상될 것으로 사료된다.

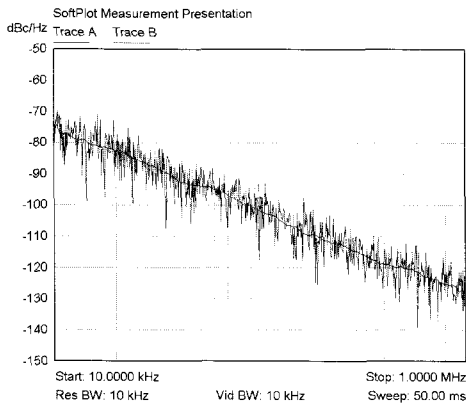


그림 6. Push-push 유전체 공진 발진기의 위상잡음 특성
Figure 6. Phase noise characteristics of the push-push DRO

그림 7은 스펙트럼 분석기에서 1MHz의 주파수 span을 가질 경우 중심주파수로부터 100KHz 떨어진 지점에서의 위상잡음 특성을 나타내는 것으로 -102.2dBc/Hz의 특성을 나타내고 있다. 본 논문에서는 결합라인의 임피던스 인버터에 버랙터 다이오드를 삽입하여 주파수 동조회로를 구현하였다. 주파수 제어를 위한 바이어스라인은 다층기판의 네 번째 금속 층에 설계하였으나 LTCC 공정상의 오차에 의해 버랙터 다이오드의 바이어스라인이 결선되어 주파수 동조 특성의 측정은 불가능하였다. 하지만 push-push 구조의 유전체 공진 발진기의 설계, 제작 및 측정 결과는 양호한 것으로 사료된다.

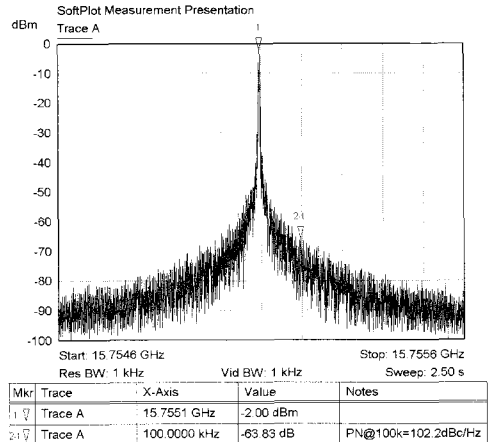


그림 7. 중심주파수로부터 100KHz 떨어진 지점에서의 위상잡음 특성
Figure 7. Phase noise characteristics at 100KHz offset frequency from carrier

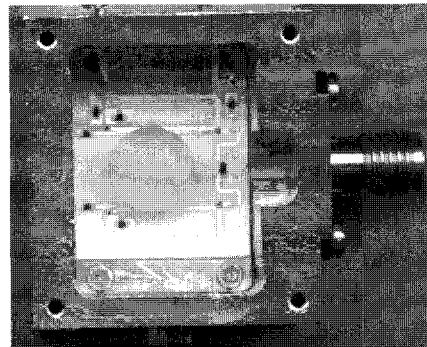


그림 8. Push-push 유전체 공진 발진기의 사진
Figure 8. Photograph of the push-push DRO

또한 그림 8은 push-push 유전체 공진 발진기의 실물 사진으로 15mm × 15mm의 회로 크기를 나타내고 있으며 단층구조상에 제작된 push-push 유전체 공진 발진기 회로에 비해 회로크기가 크게 감소되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 유전체 두께 100 μ m 및 금속 두께 10 μ m인 Ferro A6 기판을 기반으로 한 LTCC 기술을 이용하여 push-push 유전체 공진 발진기를 설계 및 제작하였다. 다

층구조의 LTCC 공정을 이용함으로써 push-push 유전체 공진 발진기의 회로의 크기는 일반적인 단층구조의 회로 설계에 비해 약 40% 이상의 회로 크기 감소효과를 얻었다. 주파수 동조회로의 바이어스라인의 결선으로 인하여 주파수 동조특성은 측정이 불가능하였지만 push-push 유전체 공진 발진기로서의 특성은 대체로 양호한 전기적 특성을 얻을 수 있었다. 제작된 push-push 유전체 공진 발진기는 대역통과필터를 사용하지 않은 상태에서 15dBc 이상의 기본 주파수 억압특성 및 25dBc 이상의 3차 고조파 억압특성을 나타내었다. 출력 전력은 2.0dBm의 케이블 손실을 포함하여 -2.13dBm 이상을 나타내었으며 발진기의 위상잡음은 중심 주파수로부터 100KHz 떨어진 주파수에서 -102.2dBc/Hz의 특성을 나타내었다. 이와 같이 제작된 push-push 유전체 공진 발진기의 설계 기술 및 제작 기법은 Ku대역 및 Ka대역의 위성통신 수신기, 무선 LAN, 이동통신 시스템 등과 같이 다양한 상업용 및 군사용 초고주파 부품 설계에 응용할 수 있다.

참고문헌

[1] B.G. Choi, et al., "A Ka-band Narrow Bandpass Filter Using LTCC Technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 9, pp. 388-389, 2003.

[2] K.H. Kim, et al., "Circuit Modeling of Interdigitated Capacitors Fabricated by High-K LTCC Sheets," *ETRI Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 182-190, 2006.

[3] J. Hesselbarth, et al., "Surface-mount High-Q Resonators for Millimeter-wave LTCC Oscillators," in *Proc. 33rd European Microwave Conference*, pp. 1283-1286, 2003.

[4] T.A. Bos, et al., "A Low Cost 16.2GHz Phase Locked Oscillator for Wireless LAN," in *Proc. IEEE MTT-S Digest*, pp. 1395-1398, 1997.

[5] L. Dussopt, et al., "A Low Phase Noise Silicon 18-GHz Push-Push VCO," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, no. 1, pp. 4-6, 2003.

[6] A.M. Pavio, et al., "A 20-40 GHz Push-push Dielectric Resonator Oscillator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 12, pp. 1346-1349, 1985.

[7] K.K. Ryu, et al., "Development of EQM (Engineering Qualified Model) Local Oscillator for Ka-band Satellite Transponder," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 40, no. 3, pp. 198-200, 2004.

저자소개



류근관 (Keun-Kwan Ryu)

1992년 광운대학교 전자통신공학과
공학사
1994년 광운대학교 전자통신공학과
공학석사

2000년 광운대학교 전자통신공학과 공학박사
2000년 3월 ~ 2003년 1월 : 한국전자통신연구원
통신위성개발센터 선임연구원
2003년 ~ 현재 : 국립한밭대학교 전자공학과 교수
※관심분야: 초고주파용 능동/수동 회로 설계



오일덕 (Eel-Deok Oh)

1968년 광운대학교 전자공학과
공학사
1982년 광운대학교 전자통신공학과
공학석사

1990년 광운대학교 전자통신공학과 공학박사
1979년 ~ 현재 : 국립한밭대학교 전자공학과 교수
※관심분야: 초고주파용 능동/수동 회로 설계



김성찬 (Sung-Chan Kim)

1999년 동국대학교 전자공학과
공학사
2001년 동국대학교 전자공학과
공학석사

2006년 동국대학교 전자공학과 공학박사
2006년 ~ 2007년 동국대학교 밀리미터파 신기술
연구센터 박사후연구원
2007년 ~ 현재 국립한밭대학교 전자공학과 교수
※주관심분야: 밀리미터파 소자 및 회로 설계, 제작