

V-band 도파관-CPW 변환 구조에 대한 연구

A Study on the V-band Waveguide-to-CPW Transitions

김 동 기 · 정 진 호* · 권 영 우

Dong-Ki Kim · Jin-Ho Jeong* · Young-Woo Kwon

요 약

본 연구를 통하여 60 GHz 근방의 V-band에서 도파관과 MMIC 집적을 위한 도파관-CPW 변환 구조가 개발되었다. 수치 해석과 반복적인 실험을 통하여 두 가지 형태의 변환 구조를 제작하였으며, 손실이 적은 수정 기판을 이용하여 광대역 및 저손실 특성을 갖도록 설계하였다. 개발된 변환 구조는 재현성이 뛰어나고, 금속 가공의 정밀도가 특성을 크게 변화시키지 않아 기존의 커넥터보다 저 비용으로 제작이 가능하였다. 본 연구를 통해 제안된 두 가지 형태의 도파관-CPW 변환 구조를 back-to-back으로 연결하여 특정한 결과 공진 구간을 제외하고 두 구조 모두 53~60 GHz에서 삽입 손실은 1.9 dB 이하, 반사 손실은 14 dB 이상의 특성을 보였다.

Abstract

In this study, waveguide-to-CPW transitions were developed for integrating waveguide and MMIC at V-band. The finite element method for numerical analysis and repeated experiments were performed to propose two types of waveguide-to-CPW transition. Using quartz substrate, proposed structures were designed for low loss as well as broadband characteristics. These waveguide-to-CPW transitions showed a good reliability and insensitivity to matching precision, and they could be fabricated with lower cost than that of the conventional connectors. Proposed two types of the structure showed insertion loss less than 1.9 dB and return loss better than 14 dB from 53 GHz to 60 GHz except unwanted resonance region, respectively.

Key words : Waveguide-to-CPW, CPS-to-CPW, Waveguide-to-Microstrip, Transition, V-band

I. 서 론

1980년대 들어서 초고주파 회로의 제작 기술 발전으로 인해 회로들을 하나의 기판에 함께 제작하는 단일 초고주파 집적 회로(MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit)가 크게 사용되었다. MMIC 회로는 반도체 공정을 기반으로 하는 평면 구조이므로 회로에 사용되는 전송선도 평면 구조를 가져야 했다. 그래서 대부분의 MMIC 회로는 평면형 전송 구조인 마이크로스트립 또는 CPW(Coplanar Waveguide)를 전송선으로 사용하여 구현되었다^{[1],[2]}. 마이

크로스트립은 MMIC 회로에서 가장 널리 사용되는 전송선으로 도체에 의한 손실이 비교적 적지만 사용 주파수가 높아지면 방사 손실(radiation loss)이 크고, 접지면과 연결을 하기 위해서 기판에 구멍을 뚫는 via-hole 공정이 추가되어야 하며, 필드가 균일한 매질에만 존재하는 것이 아니고 공기와 유전체를 매질로 사용하기 때문에 분산(dispersion) 현상이 크다는 단점이 있다. 이에 반해 CPW 구조는 도체 손실이 마이크로스트립에 비해 크지만 방사 손실이 작고 접지면과 신호선이 동일 평면에 존재하는 단일 평면 구조를 갖기 때문에 마이크로스트립에서 필요로 하

서울대학교 전기컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University)

*Department of Electrical & Computer Engineering, University of California San Diego

· 논문 번호 : 20050218-018

· 수정완료일자 : 2005년 5월 4일

는 via-hole 공정이 필요없다는 장점이 있다.

밀리미터파 대역의 시스템 구현과 시스템 및 회로 특성 측정시에 주로 구형 도파관(rectangular waveguide)을 전송선으로 사용하는데, 이는 손실이 적고 전력 용량이 크며 여러 가지 수동 소자가 잘 개발되어 있기 때문이다. 따라서 전체 시스템 구현을 위해서는 도파관과 MMIC를 적절한 구조로 연결해 주어야 한다. 본 논문에서 제안하는 도파관-CPW 변환 구조는 CPW를 전송선으로 채택하여 제작된 MMIC와 도파관을 연결하기 위한 변환 구조이다. 특히 밀리미터파 대역에서는 능동 소자의 이득이 작고 수동 소자의 손실이 크기 때문에 변환 구조의 손실이 크면 전체 시스템의 성능이 크게 저하될 수 있다. 따라서 작은 삽입 손실과 큰 반사 손실, 우수한 재현성 및 광대역 특성을 갖는 변환 구조의 개발이 밀리미터파 시스템의 성공적인 구현에 필수적인 요소라 할 수 있다.

도파관-마이크로스트립 변환 구조의 경우는 도파관-CPW 변환 구조와 달리 비교적 연구 결과가 많은 편이고, 널리 알려진 설계 방법으로 전기장-프루브 방법과 antipodal 편라인을 이용하는 방법들을 들 수 있다. 전기장-프루브 방법은 전자장 수치 해석을 통한 최적화가 이루어진 상태이다. 그러나 이 방법은 프루브와 도파관 back short 간의 간격에 따라 특성이 크게 변하여 재현성이 떨어지고, 정밀한 금속 가공이 요구되어 고 비용의 단점이 있다^[3]. 따라서 중요 설계 변수가 기판에 프린트된 금속 박막 패턴에 있어서 재현성이 뛰어나고, 정밀한 금속 가공이 필요치 않아 저 비용의 장점이 있는 antipodal 편라인을 이용하는 변환 구조에 대한 연구가 많이 수행되었다. Antipodal 편라인을 이용하는 방법의 경우 수치 해석이 쉽지 않아 주로 경험적인 설계를 통해 제작이 되어 왔으며 각 설계 변수가 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 그 성과가 아직 미비한 편이다^{[4],[5]}.

본 논문에서는 마이크로스트립-CPW 변환과 CPS-CPW 변환을 이용한 두 가지 형태의 도파관-CPW 변환 구조를 제안한다. 기판은 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 구조의 경우 127 μm , CPS-CPW 변환을 이용한 경우 520 μm 두께의 수정 기판($\epsilon_r=3.8$)을 사용하였고 설계는 EM 시뮬레이터인 IE3D와 HFSS를 사용하였다.

II. 본 론

2.1 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 도파관-CPW 변환

마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 도파관-CPW 변환은 일반적으로 널리 알려진 도파관-마이크로스트립 변환 구조에 기초하여 설계되었다^{[6],[7]}. 그림 1에 설계된 도파관-CPW 변환의 구조를 나타내었다.

그림 1에서 도파관의 dominant mode는 TE₁₀으로써 전기장의 분포는 A와 같이 y축 방향이고, E-plane 중앙이 가장 크다. 마이크로스트립 라인인 quasi-TEM 모드로서 그림 D와 같이 전기장이 -x축으로 향하고 있다. 따라서 전기장이 90도 회전하면 변환이 이루어지는데 이를 통해 antipodal finline 구조가 가능하게 된다. 단면 B와 C에서처럼 antipodal finline을 따라 전기장이 서서히 회전하다가 마이크로스트립 라인의 전기장 분포가 생성된다. 단면 D와 같이 생성된 마이크로스트립 라인의 전기장 분포는 다시 마이크로스트립-CPW 변환 구조에 의해 최종적으로 단면 E와 같은 전기장 분포를 갖게 된다.

Antipodal finline의 backside metal은 마이크로스트립의 접지면으로 front metal은 마이크로스트립으로 tapering 된다. 기판은 도파관의 E-plane 중앙에 삽입하였는데 이는 그곳에서 전기장이 가장 세기 때문이다. 임피던스 측면에서 보면 도파관의 높은 임피던스

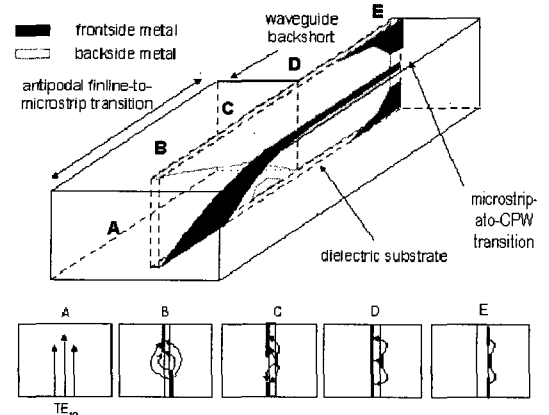


그림 1. 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 도파관-CPW 변환의 구조도

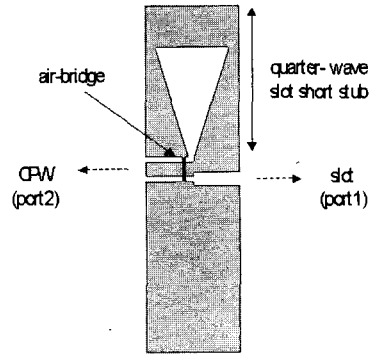
Fig. 1. The structure diagram of waveguide to CPW transition with microstrip-to-CPW transition.

스는 마이크로스트립의 낮은 임피던스와 antipodal finline에 의해 정합이 이루어지게 된다. Antipodal finline의 두 fin의 간격이 좁아지면 임피던스가 낮아지므로 도파관에서 마이크로스트립으로 진행하면서 fin 간격이 천천히 좁아지면서 임피던스 정합이 이루어지게 된다. 마이크로스트립에서 CPW로 변환되는 부분은 마이크로스트립의 50 ohm 신호선과 CPW의 50 ohm 신호선의 폭을 일치시킨 상태에서 그라운드와 신호선 사이의 간격을 점층적으로 변화시켜 임피던스 및 전기장의 급격한 변화를 방지하도록 설계하였다.

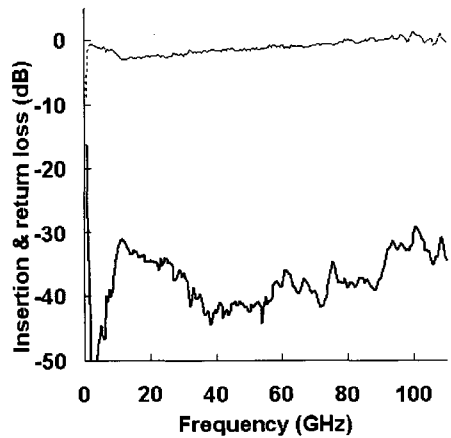
2-2 CPS-CPW 변환을 이용한 도파관-CPW 변환

CPW-슬롯라인 변환에 대한 최근 연구는 주로 광대역, 저손실, 소형화에 초점을 두고 있으며^{[8]~[11]} 특히 안테나, balanced 혼합기, push-pull 증폭기 등과 같이 balanced 신호가 요구되는 회로에 매우 유용하게 사용될 수 있다^{[12]~[14]}. 광대역 특성을 위해서는 주로 CPW-슬롯라인 cross 접합부에 복수개의 CPW (CPS) $\lambda/4$ radial 개방 또는 단락 스테브가 사용되는데 이러한 구조는 MMIC 회로에 적용할 경우 $\lambda/4$ 공진기에 의한 주파수 범위 제한 및 칩 사이즈 증가 등의 문제를 가져온다. 최근에 CPW-슬롯라인 cross 접합부에 $\lambda/4$ 공진기를 제거하고 실제적인 개방 구조를 사용한 논문들이 발표되고 있어^{[8],[9]} 이러한 문제를 해결하는 실마리를 제공하고 있다. 발표된 논문들이 제안한 구조들은 광대역 특성의 CPW-슬롯라인 변환 특성뿐만 아니라 칩 사이즈를 줄이므로 MMIC 적용에 매우 적합하나 변환부의 비대칭적인 CPW-슬롯라인 cross 접합 구조는 고주파 특성을 여전히 개선시키지 못하고 있다. 본 논문에서는 CPW-슬롯라인 cross 접합 구조를 대칭적으로 형성하여 광대역 특성을 개선한 CPW-CPS 변환 구조를 제안하였다.

제안된 uniplanar CPW-CPS 변환 구조를 그림 2(a)에 보였다. CPW 라인과 CPS 라인이 중앙에 있는 $\lambda/4$ 슬롯 단락 스테브를 경계로 서로 반대편에 있고, air-bridge를 통해 간단히 CPW-CPS 접합이 형성된다. 이러한 변환 구조는 입출력 포트 부근의 접지면을 반대편과 비슷한 구조로 가져갈 수 있어 고주파 high-모드 발생을 억제할 수 있어 광대역 특성을 확



(a) CPS-CPW 변환 구조
(a) The proposed CPS-to-CPW transition structure



(b) Back-to-back 측정 결과
(b) The measured back-to-back results

그림 2. 제안된 CPS-CPW 구조
Fig. 2. The proposed CPS-to-CPW transition structure.

보하는데 유리한 구조라 할 수 있다. 그림 2(b)에 CPW-CPS 변환 구조의 측정된 back-to-back S-parameter를 보였다. DC에서 110 GHz까지 2.3 dB 이하의 삽입 손실과 30 dB 이상의 반사 손실을 보인다.

이와 같은 방법으로 설계된 CPS-CPW 변환을 이용하여 unilateral finline 구조를 덧붙여 도파관-CPW 구조를 최종적으로 완성하였다^{[15],[16]}. 그림 3은 완성된 CPS-CPW 변환을 이용한 도파관-CPW 변환의 구조도이다. Unilateral finline 구조는 앞서 설명한 마이크로스트립-CPW 변환과 같이 도파관에서 CPS 라인으로 최대한 임피던스의 급격한 변화가 없도록 설계하였다.

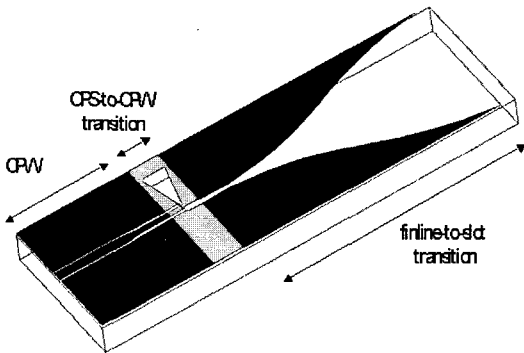


그림 3. CPS-CPW 변환을 이용한 도파관-CPW 변환 구조

Fig. 3. The waveguide-to-CPW transition using CPS-to-CPW transition.

III. 제작 및 측정 결과

설계된 두 가지 종류의 도파관-CPW 변환 구조를 제작하여 V-band에서 산란계수(S-parameter)를 측정하였다. 제작에 사용한 기판은 유전율과 손실이 작은 수정 기판($\epsilon_r=3.8$)을 사용하였으며 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 구조는 127 μm 두께의 기판을, CPS-CPW 변환을 이용한 구조는 520 μm 두께의 기판을 이용하여 제작하였다. 대역 내 삽입 손실은 변환 구조간 부정합 손실, 도파관-핀라인 변환 손실, 본딩 와이어에 의한 손실로 기인한다. 특히 520 μm 의 기판을 사용한 경우 유전체 손실이 삽입 손실에 적지 않은 영향을 미칠 것으로 예상된다. 각 도파관-CPW 변환 구조 제작 시, 기판지와 fin과 도파관과의 전기적 접촉을 위한 serrated choke를 사용하였다. Serrated choke는 $\lambda/4$ 마이크로스트립 개방 스테어로 구성되며 RF에서 도파관과 전기적 단락이 이루어지게 하고, DC에서는 개방이 되도록 설계하였다^{[14],[15]}. 이렇게 serrated choke를 사용한 이유는 물리적으로 접촉시키는 경우 변환 특성이 나쁘게 나타나기 때문이다.

그림 4, 5는 각 변환 구조의 측정된 삽입 손실, 반사 손실의 측정 결과이다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 많이 다르게 나타났는데 이는 공정이 최적화되지 않았을 뿐 아니라 모듈 제작 시에 misalignment 등이 일어나기 때문이다. 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 경우 52~60 GHz 구간에서 삽입 손실 1.5 dB 이하, 반사 손실 15 dB 이상의 특성을 보였다. 그

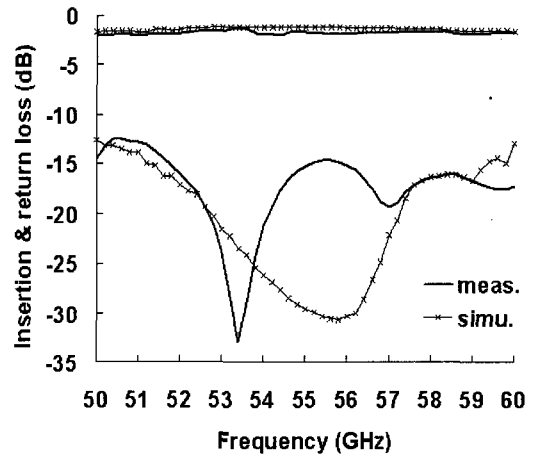


그림 4. 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 구조의 측정 결과 및 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Measured and simulated results of the waveguide-to-CPW transition using microstrip-to-CPW transition.

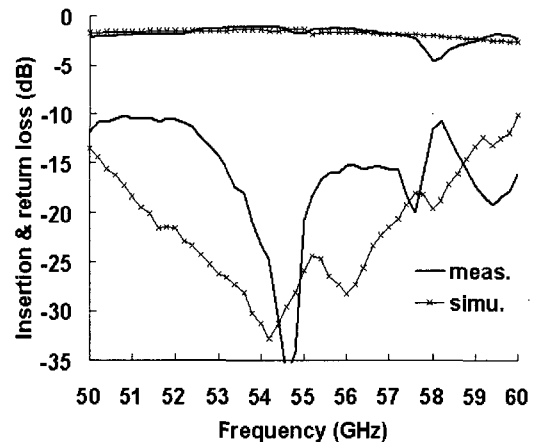


그림 5. CPS-CPW 변환을 이용한 구조의 측정 결과 및 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Measured and simulated results of the waveguide-to-CPW transition using CPS-to-CPW transition.

림 5의 CPS-CPW 변환을 이용한 구조의 경우 58 GHz 부근에서 S_{21} 과 S_{11} 이 크게 나빠지는데 이는 CPW 라인과 슬롯라인에 의해 형성된 공진 회로 때문임을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 그러나 설계 중심 주파수인 55 GHz에서는 크게 문제되지 않는다. 공진 구간을 제외한 53~60 GHz 대역에서 삽입 손실 1.9 dB 이하, 반사 손실 14 dB 이상의 특성을 보이고 있다. 그림 6은 제작된 두 가지 형태의 도파관-CPW

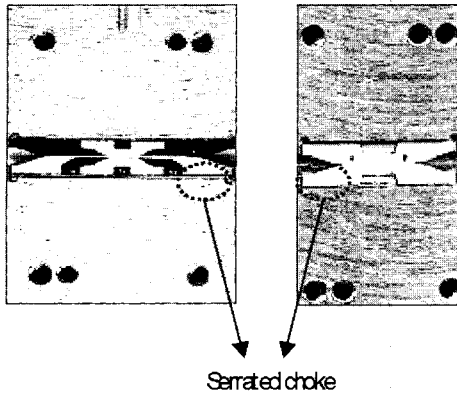


그림 6. 제작된 도파관-CPW 변환구조의 사진
Fig. 6. The photograph of waveguide to CPW transitions.

변환 구조의 사진이다. 측정 및 제작 상의 편의를 위해 별도의 와이어 본딩을 하지 않고 back-to-back으로 제작하였다. 단위 변환 구조의 사이즈는 각각 $10 \times 4 \text{ mm}^2$, $7 \times 4 \text{ mm}^2$ 이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서의 모듈 구현을 위해 필요한 도파관-CPW 변환 구조를 제안하였다. 제작된 변환 구조는 기존에 알려진 도파관-마이크로스트립 변환을 이용한 구조와, 광대역 특성을 보이는 CPS-CPW 변환을 이용한 두 가지 구조로서 각각 $127 \mu\text{m}$, $520 \mu\text{m}$ 두께의 수정기판을 사용하였다. Back-to-back으로 제작된 두 가지 변환 구조를 측정한 결과 마이크로스트립-CPW 변환을 이용한 경우 52~60 GHz에서 삽입 손실 1.5 dB 이하, 반사 손실 15 dB 이상의 특성을 얻었으며 CPS-CPW 변환을 이용한 경우 공진 구간을 제외하고 각각 53~60 GHz에서 삽입 손실 1.9 dB 이하, 반사 손실 14 dB 이상의 우수한 특성을 얻을 수 있었다.

본 연구를 통하여 밀리미터파 대역에서 널리 사용되는 전송선인 도파관과 CPW를 전송선으로 사용하는 MMIC를 저손실 특성으로 연결시킬 수 있음을 확인할 수 있었으며 차후에 전력 결합 변환 구조로의 확장을 모색할 수 있는 계기를 마련하였다.

참 고 문 헌

[1] T. Weller, L. P. B. Katehi, and G. M. Rebeiz, "High

performance microshield line components", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 43, pp. 534-543, 1995.

[2] K. Herrick, T. Schwarz, and L. P. B. Katehi, "Si-micromachined coplanar waveguides for use in high-frequency circuits", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, pp. 762-768, 1998.

[3] S. C. Shi, J. Inatani, "A waveguide to microstrip transition with a DC/IF return path and an offset probe", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, pp. 442-445, 1997.

[4] Michal Dyrk et al., "Shield microstrip aids V-band receiver designs", *Microwaves*, pp. 77-82, Mar. 1982.

[5] J. de Mingo, A. Moliner, and A. Comeron, "Waveguide-to-coupled fin-line transition in KaBand", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, pp. 363-365, 1996.

[6] 정진호, "도파관 변환 구조를 이용한 전력 결합 구조 연구", 서울대학교 전기공학부 공학석사학위논문, 1999년.

[7] B. Bhat, S. K. Koul, *Analysis, Design and Applications of Finlines*, Artech House, 1990.

[8] C. H. Ho, L. Fan, and K. Chang, "Experimental investigations of CPW-slotline transitions for uniplanar microwave integrated circuits", *IEEE MTT-S*, pp. 877-880, 1993.

[9] K. Hettak, N. Dib, A. Sheta, A. A. Omar, G. Y. Delisle, M. Stubbs, and S. Toutain, "New miniature broad-band CPW-to-slotline transitions", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, pp. 138-146, 2000.

[10] M. Gillick, L. D. Robertson, "Accurate modelling of an ultra-wideband MMIC CPW-to-slotline transition", *IEEE APMC*, pp. 279-282, 1992.

[11] D. Prieto, J. C. Cayrou, J. L. Cazaux, T. Parra, and J. Graffeuil, "CPS structure potentialities for MMICs : A CPS/CPW transition and a bias network", *IEEE MTT-S*, pp. 111-114, 1998.

[12] S. Sugawara, Y. Maita, K. Adachi, K. Mori, and K. Mizuro, "A mm-wave tapered slot antenna with

improved radiation pattern", *IEEE MTT-S*, pp. 959-962, 1997.

[13] D. Cahana, "A new coplanar waveguide / slotline double-balance mixer", *IEEE MTT-S*, pp. 967-968, 1989.

[14] P. C. Hsu, C. Nguyen, and M. Kintis, "Uniplanar broad-band push-pull FET amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, pp. 2150-2152, 1997.

[15] V. S. mottonen, "Wideband coplanar waveguide-to-rectangular waveguide transition using fin-line taper", *IEEE Microwave and Component Letters*, vol. 15, no. 2, pp. 119-121, Feb. 2005.

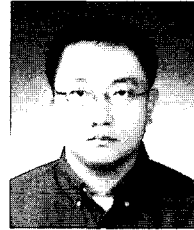
[16] T. H. Lin, R. B. Wu, "CPW-to-waveguide transition with tapered slotline probe", *IEEE Microwave and Component Letters*, vol. 11, no. 7, pp. 314-316, Jul. 2001.

김 동 기



2001년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2003년 3월~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사과정
 [주 관심분야] RF 수동소자 설계, MMIC 설계, RF MEMS

권 영 우



1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 2월: 미국 University of Michigan 전기공학과 (공학석사)
 1994년 2월: 미국 University of Michigan 전기공학과 (공학박사)
 1994년~1996년: Rockwell International Science Center, MTS
 1996년~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 부교수
 1999년~현재: 3차원 밀리미터파 창의연구단 단장
 [주 관심분야] MMIC 설계, 밀리미터파 회로 및 시스템, 능동소자 모델링, RF MEMS, Microwave cancer detecting

정 진 호



1997년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)
 2004년 9월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2004년 9월~현재: University of California San Diego, Department of Electrical & Computer Engineering, post doctor.
 [주 관심분야] 능동소자 모델링, 준광학적 전력 결합기, MMIC/OEIC 설계