

# 고출력 SP3T MMIC 스위치

## A High Power SP3T MMIC Switch

정명득\* · 전계익\*\* · 박동철\*\*\*

Myung-Deuk Jeong\* · Kye-Ik Jeon\*\* · Dong-Chul Park\*\*\*

### 요 약

광대역 고출력 SP3T MMIC GaAs PIN 다이오드 스위치를 설계, 제작하고 특성을 측정하였다. 전력단속능력을 개선시키기 위하여 다이오드의 버퍼 층을 저온 버퍼와 초격자 버퍼로 이루어진 2층 구조로 설계하였다. 개발된 다이오드의 항복전압은 65 V 이고 순방향 전압강하는 1.3 V 이었다. MMIC 스위치는 마이크로스트립 라인형으로 구현되었고 인덕턴스가 낮은 via hole 공정을 이용하여 신호를 접지하였다. 평면형 구조보다 더 낮은 기생성분과 진성영역에서 고품질을 갖는 수직형 에피택셜 PIN 구조를 사용하여 우수한 마이크로파 성능을 얻었다. 제작된 SP3T 스위치의 고출력 특성은 14.5 GHz CW에서 입력전력을 8 dBm 부터 32 dBm 까지 증가시킬 때 삽입손실은 0.6 dB보다 작고, 분리도는 50 dB보다 크게 측정되었다.

### Abstract

The monolithic single-pole three-throw(SP3T) GaAs PIN diode switch circuit for the broadband and high power application was designed, fabricated and characterized. To improve the power handling capability, buffer layers of the diode employ both low temperature buffer and superlattice buffer. The diode show the breakdown voltage of 65 V and turn-on voltage of 1.3 V. The monolithic integrated switch employed microstrip lines and backside via holes for low-inductance signal grounding. The vertical epitaxial PIN structure demonstrated better microwave performance than planar type structures due to lower parasitics and higher quality intrinsic region. As the large signal characteristics of the fabricated SP3T MMIC switch, the insertion loss was measured less than 0.6 dB and the isolation better than 50 dB when the input power was increased from 8 dBm to 32 dBm at 14.5 GHz.

Keyword : SP3T, MMIC, GaAs PIN Diode, Broadband, High Power.

### I. 서 론

초고주파 회로에 사용되는 스위치는 신호를 송·수신할 때 그 신호의 경로를 바꾸어 주거나 한쪽 단자에서 시작된 신호를 여러 가지 다른 경로로 전달해주는 기능을 하는 소자이다. 전기적으로 제어되는 스위치는 1964년 Hines가 반도체 다이오드를 이용한 RF 스위칭에 관한 기본적인 이론을 발표한 후

[1] HMIC(Hybrid Microwave Integrated Circuits) 형태로 발전되어오다가 1980년도에 이르러 반도체 공정 기술의 발달과 함께 미국을 비롯하여 유럽과 일본에서 MIMIC 프로젝트가 시작됨으로써 MMIC 스위치 분야에 관한 연구가 활발히 진행되어 관련 연구 논문이 많이 발표되었고 그 일부는 실용화되기도 하였다.

GaAs 반도체 스위치는 크게 두 가지, PIN 다이오

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* LG 종합기술원(LG Corporate Institute of Technology)

\*\*\* 충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science and Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20000308-027

· 수정완료일자 : 2000년 4월 24일

드를 이용한 것과 FET를 이용한 것으로 발전되어져 왔다.<sup>[2]</sup> FET를 이용한 스위치는 수 nano초 이하의 스위칭 속도를 가지고 수 Watt 이상의 전력을 수용할 수 있으며 FET의 전류소모가  $\mu A$  수준으로 거의 없고 외부 전류 구동기가 필요하지 않다는 장점을 가진다. FET를 이용한 스위치는 Schindler 등이 발표한 논문<sup>[3]</sup> 의하면 광대역인 2~18 GHz에서 삽입손실이 2.5 dB, 분리도가 30 dB, 입력전력이 35 dBm CW인 고출력 FET T/R 스위치가 소개되었으며 MMIC 형태로 W-band 대역까지 연구결과가 보고되고 있다<sup>[4]</sup>.

PIN 다이오드 스위치는 스위치의 성능지수(figure-of-merit)인 품질계수(quality factor)값이 일반적으로 FET의 경우보다 더 크며<sup>[2]</sup> 높은 항복전압, 높은 선형성, 낮은 삽입손실과 좋은 분리도를 가진다. 따라서 스위칭소자로서 PIN 다이오드는 아직까지 선호되고 있다. PIN 다이오드를 이용한 MMIC 스위치는 미국의 MIMIC 프로젝트에 참가한 Alpha, Honeywell, HP, MACOM, PMI, Lockheed Sanders(Lock/Sand), Texas Instruments(TI) 등의 회사를 중심으로 활발한 연구가 진행되었다<sup>[5]</sup>. 1988년에 Alpha에서 Bellantoni 등이 Ka band에서 삽입손실 0.7 dB, 분리도 32 dB, 입력전력이 35 dBm CW인 고출력 PIN 다이오드 스위치를 발표했고,<sup>[6]</sup> 1997년에는 일본에서 Shigematsu 등이 discrete PIN 다이오드를 이용하여 고출력인 20W CW SPDT 스위치를 발표하였다.<sup>[7]</sup> Discrete PIN 다이오드를 이용한 스위치는 MMIC 형태가 아니라 HMIC 형태이므로 바이어스 회로의 선택이 쉬워서 고출력이 가능했으나 소자의 크기가 커지고 손실이 증가되는 단점이 있다. 그 뒤 MMIC 스위치의 응용

범위가 밀리미터파 또는 W-band까지 확장됨에 따라 사용되는 재료도 GaAs PIN 다이오드에서 InGaAs/InP와 InP-based PIN 다이오드로 발전되고 있는 추세이다.<sup>[8]</sup>

이와 같이 외국의 경우는 MMIC 스위치에 대한 연구가 상당한 수준인데 반해 국내의 경우 최근에 MMIC 스위치에 대한 연구가 진행되고 있으나 6~18 GHz 대역에서 1 W CW 이상에서 동작되는 MMIC 스위치에 대한 연구결과는 아직까지 발표되지 않고 있다. 그러나 메모리분야의 기술발달로 물질성장기술이 진보되어 수직 에피택셜 PIN 다이오드 구조가 GaAs에서 가능하게 되었으며, 이 수직 에피택셜 PIN 다이오드는 작은 기생성분과 진성영역의 고품질을 보장한다.<sup>[9-10]</sup> 본 논문은 이러한 구조를 이용하여 광대역, 고출력 GaAs PIN 다이오드 SP3T 스위치를 설계, 제작하고 특성을 고찰하였으며, 표 1은 기 발표된 논문과의 성능 비교를 나타내었다.

## II. 수직 GaAs PIN 다이오드

그림 1은 수직 GaAs PIN 다이오드의 전자 현미경 사진이다. 이 수직 GaAs PIN 다이오드에서 진성영역의 두께는  $2.5 \mu m$  이며 65 V 이상의 역방향 항복 전압과 1.3 V의 turn on 전압 특성을 가진다.

이 다이오드의 RF 등가 모델은 그림 2와 같다.<sup>[11],[12]</sup> 다이오드가 순방향 바이어스일 때  $R_p$ 는 다이오드 단자와 관계된 기생저항 성분이며  $R_j$ 는 PIN 다이오드의 P-I 계면에서의 접합 저항을 말한다. DC와

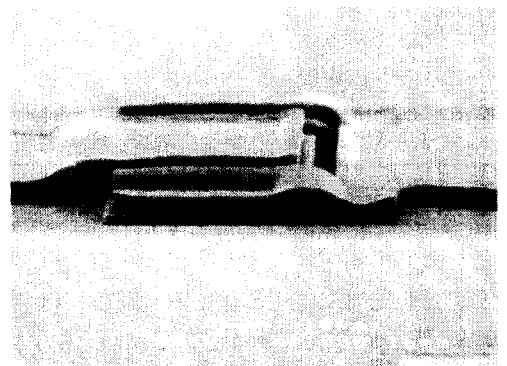


그림 1. PIN 다이오드의 SEM 사진  
Fig. 1. PIN diode SEM photograph.

표 1. 보고된 PIN 다이오드 스위치와의 비교  
Table 1. Comparison of reported PIN diode switches.  
(typical performance).

참고문헌	주파수 [GHz]	삽입손실 [dB]	분리도 [dB]	입력 전력 CW[dBm]
3	2~18	2	30	35
6	30	0.7	32	35
11	0.1~20	1.1	42	30
본 논문	6~18	0.6	50	32

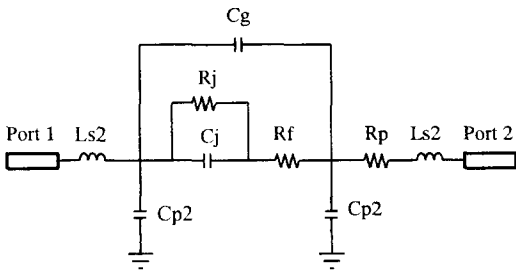


그림 2. PIN 다이오드의 RF 등가회로 모델  
Fig. 2. RF equivalent circuit model of PIN diode.

저주파에서  $R_j$ 는 PIN 다이오드의 주된 저항이다. 등가회로의 직렬저항  $R_f$ 는 PIN 다이오드의 I 영역에서의 반송자 재결합으로부터 기인한다. 주파수가 높아질수록 접합용량( $C_j$ )이 단락되므로 직렬저항( $R_f$ )이 접합 저항( $R_j$ )보다 더 중요해진다. 다이오드가 역방향 바이어스일 때  $R_j$ 와  $R_f$ 는 거의 개방 상태가 되며 결과적으로 다이오드에서 가장 중요한 요소는 극간용량  $C_g$ 와 직렬저항  $R_p$ 가 된다.

순방향 바이어스 인가시 앞서 말한 등가회로 상에서 저항 값은 전류가 증가함에 따라 저항 값이 감소하는데, 순방향 전류가 10 mA 이상일 때 저항 값이 1.6 Ω 정도였다. 그리고 역방향 바이어스 변화에 따른  $C_g$  값의 변화는 -5 V 이상의 역방향 바이어스일 때  $C_g$ 가 0.06 pF 정도로 역방향 바이어스 증가에 따라 거의 변화가 없는 것으로 일정하게 측정되었다. 결국 순방향 전류는 10 mA 이상, 역방향 전압은 -5 V 이상 인가시 다이오드가 완전히 on/off 되는 것을 알 수 있다.

### Ⅲ. 회로 설계

그림 3은 SP3T의 개략 회로도이다. 이 회로의 특징은 출력포트가 모두 대칭구조이며, 두 가지 바이어스 공급되고, 입력포트 쪽에 높은 저항을 병렬로 연결함으로써 뛰어난 고출력용 스위치로 동작한다. 삽입손실을 줄이고 분리도를 증가시키기 위해 직렬-병렬-병렬 스위치 구조를 사용하였다. 두 개의 병렬 다이오드 사이의 전송선은 높은 주파수에서 최적의 분리도를 가지도록 길이를 조절하였다. 또한 전송선의 폭은 ON 상태에서 병렬 다이오드의 기생용량을

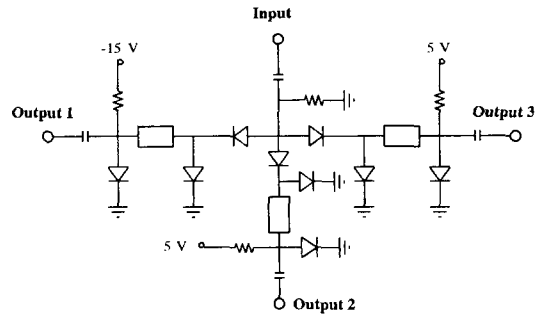


그림 3. SP3T 스위치 회로도  
Fig. 3. Schematic of the SP3T switch.

정합시키기 위해 중요하다. 본 연구에서 사용된 전송선의 폭은  $30 \mu\text{m}$ 로 하였다.<sup>[11-12]</sup> 그림 3의 바이어스 회로는 +5 V와 -15 V에 동작되도록 하였다. 도통상태에서 -15 V는 입력단자와 출력단자의 저항에 의해 10 mA 정도 흐르게 하였으며, 차단상태에서 +5 V는 직렬 PIN 다이오드 하나에 걸리는 역방향 바이어스가 -15 V가 되도록 하였다.

본 스위치는 높은 분리도, 칩 크기 및 회로 배치 등의 까다로운 조건과 함께 인덕터(inductor)를 칩 외부에서 구현해야 했다. 따라서 기본 핵심소자인 다이오드 자체의 RF 특성이 무엇보다도 중요하였다. 설계회로를 시뮬레이션 한 결과, DC부터 18 GHz까지 1 dB 이하의 삽입손실과 56 dB 이상의 분리도를 예측할 수 있었다.

### Ⅳ. 측정결과

그림 4는 제작된 SP3T의 모노리식 스위치 회로

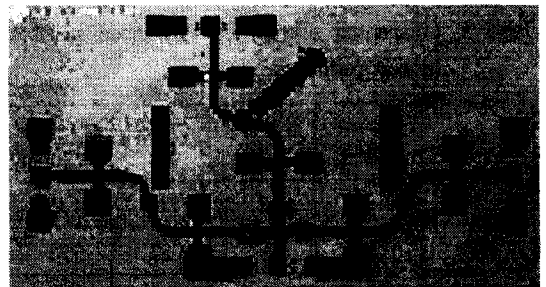


그림 4. SP3T 스위치 제작 사진  
Fig. 4. Photograph of the fabricated SP3T switch.

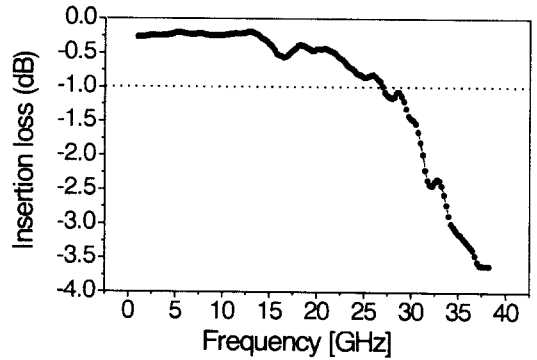
사진이다. 실제 크기는 1.6 mm × 2.6 mm 이다. 각 출력포트의 중간정도에 위치한 직사각형은 튜닝을 하기 위해 개방 스테브를 연결한 것이다.

앞에서 열거된 제작된 스위치의 소신호 특성 및 대신호 특성 측정결과의 바이어스 조건은 역방향 전압이 -15 V(off) 이고 순방향 전류는 10 mA가 흐르게 하였다. 3개의 출력단자 중에서 측정에 사용되지 않는 포트는 50 Ω으로 정합되어 일종의 흡수형(absorptive type) 스위치로 동작한다.

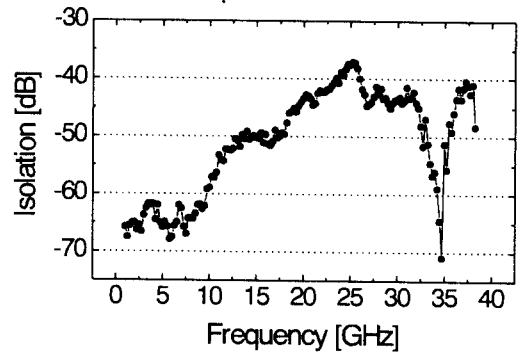
소신호 특성은 입력전력을 -10 dBm으로 하고 network analyzer를 사용하여 삽입손실, 분리도, 반사손실을 측정하였다. 먼저 삽입손실은 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 DC-26.5 GHz 에서 1 dB 이하의 특성을 가졌으며, 시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 그림 5(b)는 DC-18 GHz 구간에서 분리도가 50 dB 정도로 높은 특성을 보여주며 시뮬레이션 결과보다 약 6 dB 정도 차이가 있으나 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그림 5(c)는 출력포트 3개 중에서 한 포트는 "on" 상태로 연결시키고 다른 두 포트는 "off" 상태로 50 Ω에 정합시킨 후 측정한 "on" 상태에서의 반사손실로서, DC-25 GHz 구간에서 -10 dB 이하의 특성을 가진다.

그림 6은 대신호 특성 측정을 위한 구성도이다. 전원(source)로부터 나온 14.5 GHz의 RF 신호가 구동 증폭기(drive amp.)에서 32 dBm까지 증폭되어 바이어스 티(bias tee)를 거쳐 DUT로 들어간다. 이때 구동 증폭기 바로 다음에 위치한 입력단 전력 측정기로 입력전력을 측정한다. 그리고 DUT를 거쳐 나온 출력신호는 출력 측 바이어스 티 다음 단에 위치한 방향성 결합기를 통해 출력단 전력 측정기와 스펙트럼 분석기에서 측정된다. 전원 다음에 위치한 아이솔레이터(isolator)는 구동증폭기에서 반사되는 신호로부터 전원을 보호하는 역할을 한다. 측정에 이용되는 각종 부품 및 케이블의 손실을 보정하기 위해서 접선처럼 각 부분을 나누어 캘리브레이션(calibration) 하여 측정하였다. 또한, 다이오드의 DC 바이어스 전류가 작아서 열적 특성 변화는 고려하지 않았다.

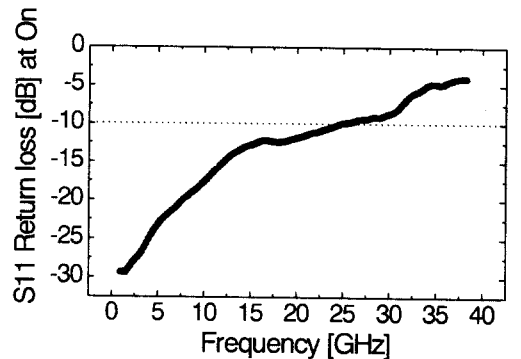
그림 7은 제작된 스위치의 대신호 특성 측정결과로서 도통상태일 때의 입력 전력 대출력 전력 특성이다. 14.5 GHz에서 입력전력을 CW 32 dBm까지 증가시킬 때 왜곡이 없는 특성을 갖는 것을 볼 수 있



(a) 삽입손실  
(a) Insertion loss.



(b) 분리도  
(b) Isolation.



(c) 반사손실  
(c) Return loss.

그림 5. 제작된 스위치의 소신호 특성 측정결과  
Fig. 5. Measured small signal characteristics of the fabricated switch.

다. 여기서, 14.5 GHz에서 32 dBm의 전력수준은 유용한 측정 장비에서 가능한 최대 전력이었다. 또한

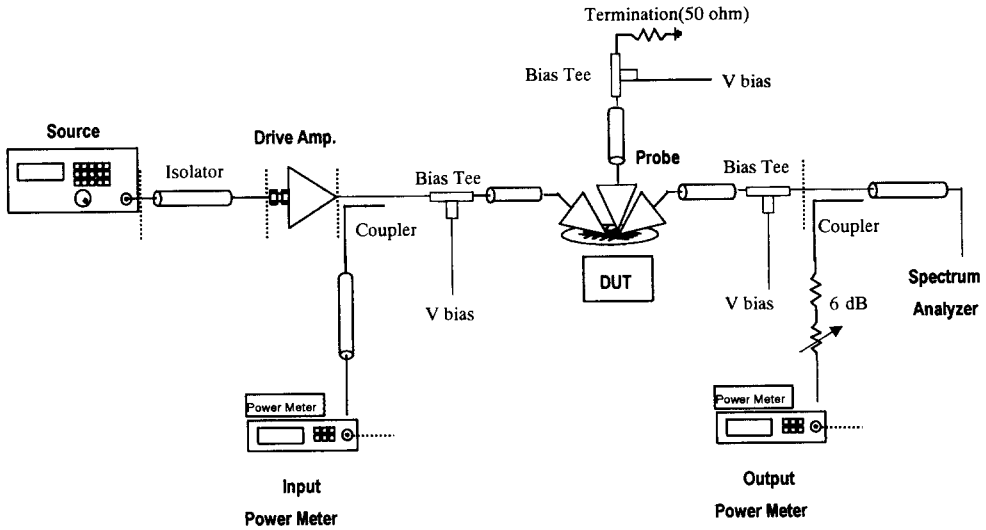


그림 6. 대신호 특성 측정 구성도  
Fig. 6. Measurement set-up for the large signal characteristic.

특성곡선의 선형성으로 볼 때, 적어도 CW 35 dBm 정도까지는 양호한 특성을 가질 것으로 사료된다. 이때 입력 단자의 저항 값의 조절에 따라 이러한 전력 단속 능력(power handling capability)을 증가시킬 수 있다. 삽입손실은 0.6 dB 이하이며 분리도는 50 dB 정도의 특성을 가진다.

### V. 결 론

GaAs PIN 다이오드는 수직 에피택셜 구조로서 진성 영역의 면적은  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  이며 65 V의 역방향

항복 전압과 1.3 V의 turn on 전압강하를 보였다. 설계된 스위치구조는 직렬-병렬-병렬 구조를 이용하여 넓은 주파수 영역에서 적은 삽입손실과 큰 분리도 특성을 얻었다. 제작된 스위치의 소신호 특성은 광대역인 DC-18 GHz 구간에서 삽입손실은 0.6 dB 이하, 분리도는 50 dB 이상이고, 반사손실은 -10 dB 보다 작게 측정되었다. 또한 14.5 GHz에서 입력전력이 32 dBm CW일 때 0.6 dB 이하의 삽입손실과 50 dB 이상의 분리도를 갖는 우수한 고출력 특성을 보여주고 있다.

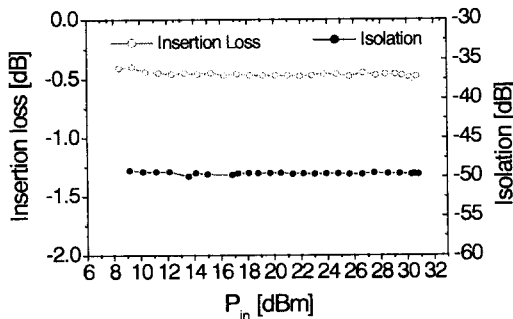


그림 7. 제작된 스위치의 대신호 특성  
Fig. 7. Measured large signal characteristics of the fabricated switch.

### 참 고 문 헌

- [1] M.E. Hines, "Fundamental limitations in RF switching and phase shifting using semiconductor diodes," *Proc. IEEE*, vol. 52, pp. 697-708, June, 1964.
- [2] A. Gopinath, "Comparison of GaAs MESFET and GaAs p-i-n diodes as switch elements," *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-6, no. 10, Oct., 1985.
- [3] M. J. Schindler and T. E. Kazior, "A high power 2~18 GHz T/R switch," *IEEE MMWMC Symp.*

*Dig.*, pp. 119-122, 1990.

[4] F. Sasaki, H. Kawasaki, H. Tokuda, and S. Kamihashi, "W-band SPST transistor switches," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 6, no. 9, Sep., 1996.

[5] *1991 U.S. MMIC Databook*, 1991.

[6] J. V. Bellantoni, D. C. Bartle, D. Payne, G. Mcdermott, S. Bandla, R. Tayrani, and L. Raffaelli, "A monolithic high power Ka-band PIN switch," *IEEE MMWMC Symp. Dig.*, pp. 47-50, 1989.

[7] T. Shigematsu, N. Suematsu, N. Takeuchi, Y. Iyama, and A. Mizobuchi, "A 6~18 GHz 20W SPDT switching using shunt discrete PIN diodes," *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 526-530, 1997.

[8] E. Alekseev, D. Pavlidis, J. Dickmann, and T. Hackbarth, "W-band InGaAs/InP PIN diode monolithic integrated switches," *IEEE GaAs IC Symp. Dig.*, pp. 285-288, 1996.

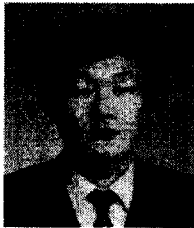
[9] R. Tayrani, D. C. Bartle, and N. J. Barret, "GaAs surface oriented microwave PIN diode," *IEEE GaAs Symp. Dig.*, pp. 85-87, Oct. 1984.

[10] D. Payne, D. C. Bartle, S. Bandla, R. Tayrani, and L. Raffaelli, "A GaAs monolithic PIN SPDT switch for 2~18 GHz applications," *IEEE GaAs IC Symp. Dig.*, pp. 178-180, 1989.

[11] D. D. Heston, D. J. Seymour, and Donna Zych, "100 MHz to 20 GHz monolithic single-pole, two-, three-, and four-throw GaAs PIN diode switches," *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 429-432, 1991.

[12] J. L. Lee, D. Zych, E. Reese, and D. M. Drury, "Monolithic 2~18 GHz low loss, on-chip biased PIN diode switches," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 43, pp. 250-256, Feb., 1995.

정 명 득



1989년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 1998년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 마이크로파 소자

전 계 익

1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)  
 1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1998년 7월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
 1998년 7월~현재: LG종합기술원 선임연구원  
 [주 관심분야] 초고주파 집적회로, RF Device Modeling, 초고주파 능동소자

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)  
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기 전자공학과 (공학석사)  
 1984년 12월: University of California, Santa Barbara (공학박사)  
 1976년~현재: 충남대학교 공과대학 전과공학과 교수

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수  
 1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson  
 1998년~현재: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson  
 2000년~현재: 한국전자과학회 회장  
 [주 관심분야] Microwave and millimeter-wave passive devices, EMC/EMI topics, and Antennas.