

# GaAs PIN Diode를 이용한 3:1 대역폭 스위치 모듈

## 3:1 Bandwidth Switch Module by Using GaAs PIN Diode

정 명 득 · 이 경 학\* · 박 동 철\*\*

Myung-Deuk Jeong · Kyung-Hack Yi\* · Dong-Chul Park\*\*

### 요 약

6~18 GHz 주파수대역에서 사용되는 흡수형의 SP3T 및 SP8T 스위치 모듈을 설계 및 제작하였다. 스위치 모듈에 사용된 MMIC 칩의 에피구조는 저 손실과 고 전력용으로 설계되었다. 최대입력전력은 SP3T 스위치 모듈이 2 W이고 SP8T 스위치 모듈이 1 W이다. 200 nsec의 고속 스위칭을 위한 구동회로를 모듈에 내장하였다. 모듈의 최대삽입손실은 SP3T 및 SP8T에 대해 각각 2.8 dB, 4.2 dB로 측정되었다. 입·출력포트간 분리도는 모두 55 dB 이상을 얻을 수 있었다. 두 스위치 모듈은 전자전 시스템에 적용하기 위한 관련 환경시험을 모두 통과하였다.

### Abstract

Absorptive type SP3T(Single Pole Three Throw) and SP8T switch modules over the 6~18 GHz are designed and fabricated. The epitaxial structure of GaAs PIN diode for switch modules are designed for low loss and high power capability. The maximum input power of SP3T and SP8T switch modules are 2 W and 1 W, respectively. The switching time with driver circuit is less than 130 nsec. The maximum insertion loss of SP3T switch module and SP8T module shows 2.8 dB and 4.2 dB, respectively. The isolation between input port and output port is more than 55 dB. Two switch modules for electronic warfare system have passed the environment tests of the related test items.

Key words : switch module, broadband, GaAs PIN diode, MMIC, high power

### I. 서 론

통신장비나 전자전 장비에 널리 사용되는 스위치는 입력되는 신호의 경로를 제어하는 역할을 하는 소자로 다양한 응용분야를 가지고 있다. 전기적으로 제어되는 스위치는 1964년 Hines가 반도체 다이오드를 이용한 RF 스위칭에 관한 기본적인 이론을 발표한 후<sup>[1]</sup> HMIC(Hybrid Microwave Integrated Circuits) 형태로 발전되어오다가 1980년도에 이르러 반도체 공정기술의 발달과 함께 미국을 비롯하

여 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 다이오드를 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 장점

국방과학연구소(ATRC-2-2, ADD)

\*LG전자기술원(LG Elite)

\*\*충남대학교(Department of a Radio Science Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호: 20020125-008

· 수정완료일자: 2002년 3월 19일

을 가진다.

스위칭 소자로는 GaAs 기반의 PIN 다이오드 스위치는 스위치의 성능지수인 품질계수(quality factor)값이 일반적으로 FET의 경우보다 더 크며<sup>[2]</sup>, 두꺼운 i층이 있어 항복 전압이 높을 뿐 아니라 그 자체가 가지는 높은 선형성 때문에 고 전력을 단속해야 하는 시스템에 널리 사용되고 있다. PIN 다이오드의 장점은 on 상태에서 낮은 저항을 갖고 off 상태에서 낮은 기생 정전 용량을 갖기 때문에 다른 소자에 비해 상당히 우수한 스위치 특성을 가진다는 점이다.

PIN 다이오드를 이용한 MMIC 스위치는 1988년에 Alpha는 Ka band에서 삽입손실 0.7 dB, 분리도 32 dB, 입력전력이 35 dBm CW 인 고풍력 PIN 다이오드 스위치를 발표했고<sup>[3]</sup>, 1997년에 일본에서 Shigematsu 등이 discrete PIN 다이오드를 이용하여 고풍력인 20W CW SPDT 스위치를 발표하였다<sup>[4]</sup>. Discrete PIN 다이오드를 이용한 스위치는 MMIC 형태가 아니라 HMIC 형태이므로 바이어스 회로의 선택이 쉬워서 고풍력이 가능했으나 소자의 크기가 커지고 손실이 증가되는 단점이 있다. 그 뒤 MMIC 스위치의 응용범위가 밀리미터파 또는 W-band까지 확장됨에 따라 사용되는 재료도 GaAs PIN 다이오드에서 InGaAs/InP와 InP-based PIN 다이오드로 발전되고 있는 추세이다<sup>[5]</sup>.

표 1은 General Microwave Corporation사의 SP3T

표 1. 외국제품과의 성능 비교

Table 1. Comparison of SP3T and F9130W. (typical performance)

항 목	성 능	
	개발품 (SP3T)	외국제품 (F9130W)
동작주파수	6~18 GHz	6~18 GHz
전압정제파비 [VSWR]	2 : 1 이하	2 : 1 이하
분리도	55 dB 이상	55 dB 이상
최대입력전력 (CW)	>33 dBm	>30 dBm
삽입손실	2.8 dB 이하	2.8 dB 이하
스위칭 시간	130 nsec	200 nsec 이하
소모전력	0.3 W 이하	0.4 W 이하
크기/무게	동 등	

모듈인 F9130W과의 성능 비교를 나타내었다.

본 논문에서는 국내기술로 개발된 PIN 다이오드를 이용하여 스위치 모듈에 필요한 MMIC 칩인 SPDT, SP3T, SP4T, 흡수형 칩 및 discrete shunt PIN diode를 만들어 6~18 GHz의 광대역에서 동작하는 초고주파 스위치 모듈을 제작하였다. 전기적 특성 뿐만 아니라, 실제 시스템에 사용하기 위하여 고온, 저온, 열충격, 습도, 진동, 충격, 등의 제반 환경시험을 실시하여 통과하였다.

## II. 스위치 모듈 설계 및 제작

전체 시스템이 요구하는 SP16T의 스위치 모듈을 구현하기 위해 SP3T 모듈 1개와 SP8T 모듈 2개를 사용하였다. SP3T 모듈은 SP3T MMIC 칩 1개, SP8T 모듈은 SPDT MMIC 칩 1개와 SP4T MMIC 칩 2개를 사용하여 모듈을 구현하였다.

### 2-1 MMIC Chip 설계 및 제작

저 손실과 고 전력을 요구하는 스위치 모듈의 사양을 만족시키기 위하여 그림 1과 같은 에피구조를 설계하였다. 그림 1은 기존의 에피구조중 i층 버퍼를 low temperature buffer와 superlattice buffer로 구성되도록 설계 및 제작함으로써 기생 diode로 인한 전류의 누설을 막을 수 있도록 하였다. 즉, 2 W 이상의 고 전력이 통과할 때 신호의 누설이 생기지 않도록 설계하였다. 개발된 MMIC 칩의 GaAs PIN 다이오드는 turn-on 상태에서 1.5 Ohm의 순방향 저항과 역방향 상태에서 30 fF의 기생 커패시턴스를 갖는다.

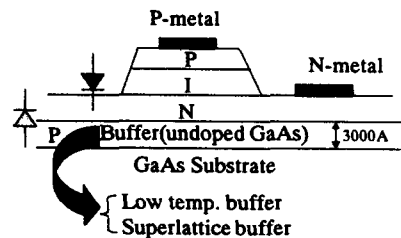


그림 1. 핀 다이오드 에피구조

Fig. 1. Epitaxial structure of PIN diode.

## 2-2 모듈 구조 설계

삽입손실을 줄이고 분리도를 증가시키기 위해 직렬-병렬-병렬의 구조가 MMIC 내부에 구현되어 있다. 그러나 MMIC만을 사용하여 마이크로 스트립 구조로 모듈을 만들면 요구 사양인 55 dB 이상의 분리도를 얻기 어렵다. 그 이유는 양 포트에서 연결되는 마이크로 스트립 라인에서 방사되고 흡수되는 전력 때문인데, 이러한 현상은 그림 4와 같이 연결되어 있지 않은 두 마이크로 스트립 사이의 분리도를 직접 측정해 보면 쉽게 확인할 수 있다. 2 mm 거리로 끊어진 마이크로 스트립이 가지는 분리도는 18 GHz 에서 45 dB 정도였다. 그 이상의 분리도를 얻기 위해서는 MMIC 칩과 더불어 분리된 채널 (isolated channel)을 형성하여 추가적인 회로를 구성해야 한다. 추가로 된 병렬 다이오드는 분리도를 증가시키면서 반사손실을 최소화하기 위하여 18 GHz 의 1/4 파장 간격으로 배치된다.

55 dB 이상의 분리도를 얻기 위하여 모듈내의 RF 신호 경로에 채널을 파서 인접한 신호경로와 상호작용을 억제해야 한다. 최적의 채널 높이와 넓이를 얻기 위하여 HFSS를 사용하여 EM 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과가 60 dB의 분리도를 얻을 수 있었다. 이 결과를 적용하여 그림 9(SP3T) 및 그림 10(SP8T)에 나타난 모듈의 채널을 설계하였다.

## 2-3 구동회로

각각의 MMIC 칩은 높은 분리도 등, 요구되는 사양을 만족시키기 위해 MMIC 칩 외부에서 전원을

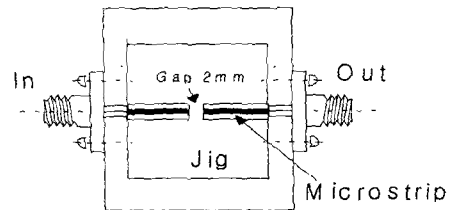


그림 4. 끊어진 마이크로 스트립 라인의 분리도 측정 치구

Fig. 4. Test jig of the microstrip line gap for isolation measurement.

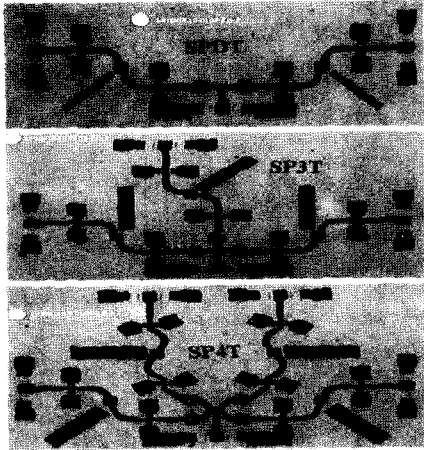


그림 2. SPDT, SP3T 및 SP4T MMIC 칩 사진  
Fig. 2. Photograph of SPDT, SP3T and SP4T MMIC Chips.

삽입손실을 줄이고 분리도를 증가시키기 위해 diode가 직렬-병렬-병렬로 연결된 구조로 MMIC화 하였다. 그림 2는 제작된 SPDT, SP3T 및 SP4T MMIC 칩 사진들이다.

그림 3은 SP3T와 SP8T 스위치모듈에 사용된 SPDT, SP3T, SP4T MMIC 칩의 on-wafer 특성을 보여 준다. SPDT, SP3T, SP4T의 삽입손실을 0.3 dB, 0.5 dB, 0.6 dB 미만을 각각 얻었다. 분리도는 최소 40 dB 이상을 나타내고 있다.

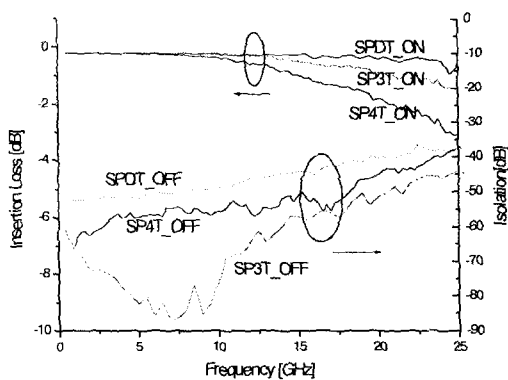


그림 3. SPDT, SP3T 및 SP4T MMIC 칩의 On-wafer 특성

Fig. 3. On-wafer characteristics of SPDT, SP3T and SP4T MMIC chips.



그림 5. 마이크로 에어 코일 인덕터 사진  
Fig. 5. Photograph of Micro-Air-Coil-Inductor.

공급하는 off-chip 바이어스 방식을 선택하였다. 그리고 200 nsec 미만의 고속스위칭을 위해 모듈 내부에 고속 op-amp.를 이용한 bias 구동회로를 내장하였다. 구동회로는 고속 동작을 위하여 비 반전(non-inverting) op-amp. 구조를 사용하였다. Op-amp.는 CLC432 고속 op-amp. 칩을 사용하였으며, 입력이 5 V가 들어가면 feedthru를 통하여 3.6 V 정도의 전압이 출력되어 RF 경로를 off 시키고, 0 V가 들어가면 -13.5 V가 출력되어 경로를 on 시키게 된다.

그림 5는 마이크로 에어 코일 인덕터(Micro-Air-Coil-Inductor)가 조립된 모양이다. 30 GHz 이상의 공진 주파수를 얻기 위하여 제작된 인덕터 솔레노이드(solenoid)의 내경은 250  $\mu\text{m}$ 이고 30  $\mu\text{m}$  코일을 사용하였다. 바이어스 인덕터가 주는 손실은 0.1 dB 이하가 되도록 솔레노이드의 길이와 꼬리의 길이 및 전송선로와의 이격을 최적화 하였다.

이 인덕터는 RF 초크(choke) 기능과 DC 전달을 담당한다. 초소형으로 제작된 인덕터는 18 GHz의 높은 주파수에서도 발진하지 않고 높은 임피던스를 보일 수 있는 솔레노이드형 인덕터를 Au wire로 제작하였다.

#### 2-4 RF 회로 설계

그림 6과 그림 7은 제작된 흡수형 SP3T, SP8T 스위치 모듈의 대략적인 회로도들이다. 여기서, 흡수형이란 off 상태의 출력포트가 50 Ohm으로 보이는 형태이다.

그림 6에서 on 상태인 RF신호 경로의 전류는 port 1에서 port 2 방향으로 흐르며  $V_0$ 가 -13.5 V이고  $V_1$ 이 음전압이 되어  $D_1$ 이 도통되고  $D_2 \sim D_3$ 는

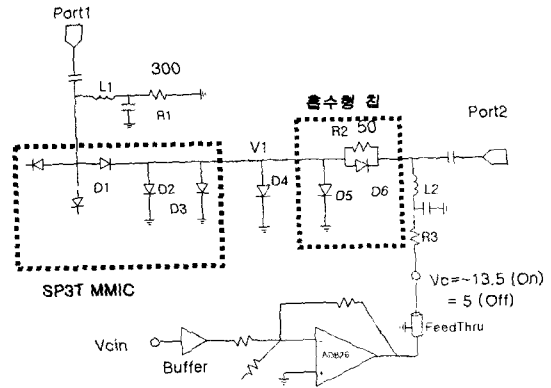


그림 6. SP3T 스위치 모듈의 RF 회로  
Fig. 6. RF Circuit of SP3T module.

역 방향 전압이 걸리게 된다. 여기서,  $D_4$ 는 분리도를 개선하기 위해 추가된 discrete 병렬 다이오드이다.

그림 7도 마찬가지로 op-amp.의 출력전압이 -15 V 이면 RF 경로가 on 되고, 5 V이면 off 된다. SP8T 모듈 회로는 그림 7에서 보는 바와 같이 SPDT, SP4T, 흡수형 칩으로 구성되어 있다.

그림 8은 그림 6과 7에 표시된 흡수형 칩 사진으로 다이오드와 50 Ohm 저항이 병렬로 연결되고, 거기에 병렬로 다이오드 1개 연결되어 있는 구조이다. 저항과 병렬로 연결되어 있는 다이오드가 on 되면 신호가 출력되고, 이 다이

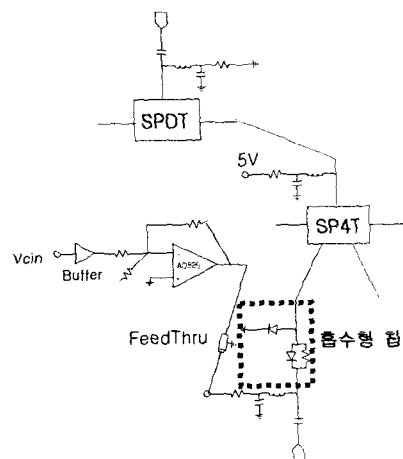


그림 7. SP8T 스위치 모듈의 RF 회로  
Fig. 7. RF Circuit of SP8T module.

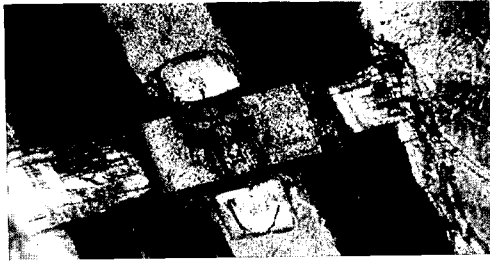


그림 8. 흡수형 MMIC 칩 사진  
Fig. 8. Photograph of the absorptive MMIC chip.

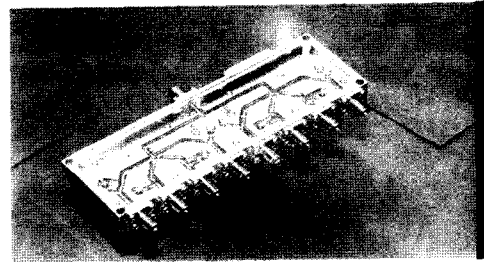


그림 10. SP8T 스위치 모듈 사진  
Fig. 10. Photograph of SP8T module.

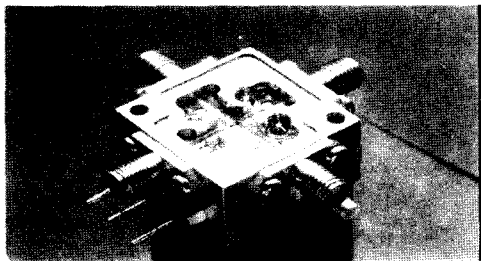


그림 9. SP3T 스위치 모듈 사진  
Fig. 9. Photograph of SP3T module.

오드가 off 되면 출력포트가 50 Ohm으로 보여 흡수형이 된다. 그리고 병렬로 연결된 다이오드와 저항은 on 상태와 off 상태를 유지하기 위한 전류를 공급하는 경로 역할과 출력포트를 중단시키는 역할을 함으로서 on/off 두 상태에서 모두 낮은 반사계수를 갖도록 한다. 즉, 흡수형 칩은 bias 회로를 간단하게 하고 off 상태에서 출력 임피던스가 정합 되도록 해준다. 그리고 분리도를 개선하기 위해 MMIC칩 외부에 추가로 요구되는 병렬다이오드를 이 흡수형 칩에 포함시켜 칩의 개수도 줄여주는 역할을 한다.

일반적으로 모듈을 만들 때 고려해야할 사항 중에 하나가 콘넥터 손실(connector loss)이다. 요구되는 환경시험을 만족하기 위해서는 hermetic sealed RF 콘넥터를 사용하여 모듈을 hermetic sealing 시켜야 했다. 보통 hermetic sealed 콘넥터는 일반 콘넥터보다 손실이 더 크며 조립에 따른 특성변화가 민감하므로 모듈 몸체(body)에 결합할 때 접촉 및 정합에 각별히 신경을 써야 한다. 한 예로, 18 GHz에서 SP3T 모듈의 삽입손실 2.8 dB 중에서 절반 이상이

전송선로와 콘넥터에 의한 손실이었다.

그림 9는 제작된 SP3T 스위치 모듈의 사진이며, 그림 10은 제작된 SP8T 스위치 모듈의 사진이다.

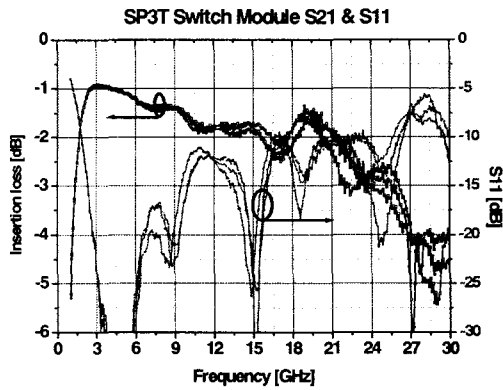
### Ⅲ. 측정 및 결과

그림 11은 SP3T 모듈의 삽입손실과 반사손실 및 분리도를 측정된 것이다. 삽입손실은 6~18 GHz대역에서 요구 사양인 2.8 dB 미만을 만족하고 있다. 반사손실도 VSWR 2.0:1 미만을 만족한다. 분리도는 3 포트 모두 55 dB 이상을 나타내고 있다. 여기서 분리도는 출력포트 중 어느 한 포트가 on 되어 있을 때, off 포트에서의 입력과 출력신호의 비로 정의하였다.

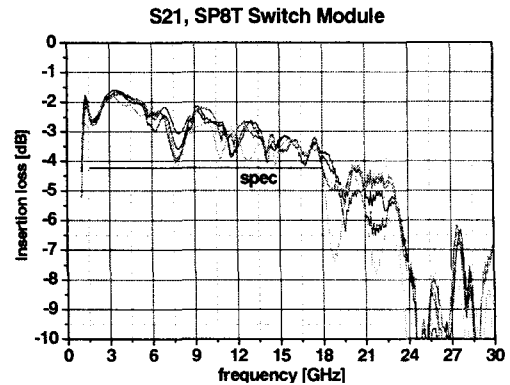
그림 12는 SP8T 모듈의 삽입손실과 반사손실 및 분리도를 측정된 것으로 각 그림은 출력포트 8개에 대한 특성곡선이다. 삽입손실은 6~18 GHz 대역에서 요구 사양인 4.2 dB 미만을 만족하며, 반사손실도 흡수형 칩을 사용하여 VSWR 2.0:1 미만을 만족하게 하였다. 분리도는 8포트 모두 55 dB 이상을 나타내고 있다.

그림 13은 SP3T와 SP8T 모듈의 최대입력전력 특성을 나타낸 것으로, 둘 다 -5V와 15V 전원 공급시 측정하였다. SP3T의 경우 33 dBm, SP8T의 경우도 30 dBm 이상을 만족하여 요구 사양을 충족시켰다. 입력전력은 HP83732A signal source에서 나온 신호를 자체 제작한 전력증폭기를 사용하여 33 dBm까지 증폭하였다. 그 이상의 전력에서는 가지고 있는 장비의 한계 때문에 측정하지 못했다.

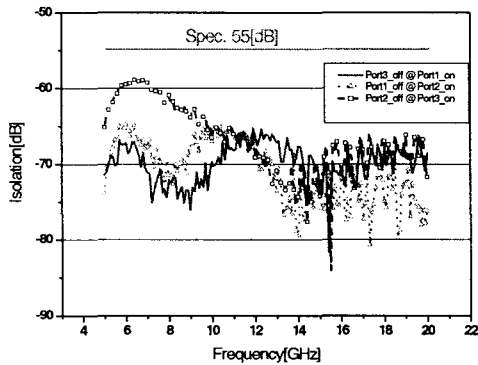
스위치모듈의 스위칭시간은 HP8990A peak po-



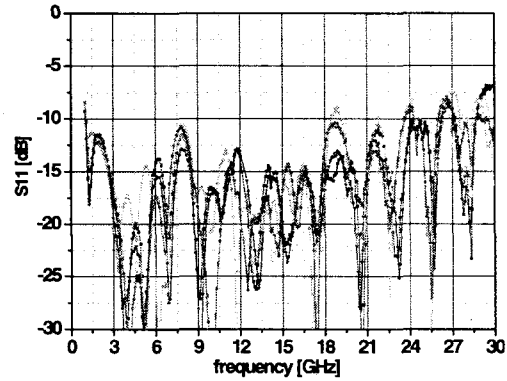
(a) 삽입손실, 전압정재파비  
(a) Insertion loss, VSWR



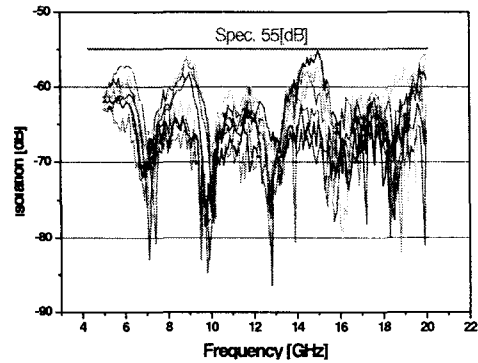
(a) 삽입손실  
(a) Insertion loss



(b) 분리도  
(b) Isolation



(b) 전압정재파비  
(b) VSWR



(c) 분리도  
(c) Isolation

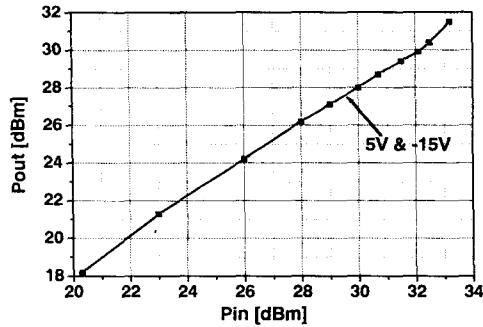
그림 11. SP3T의 RF 모듈 특성  
Fig. 11. RF characteristics of SP3T module.

wer meter를 이용하여 측정하였고, digital signal source와 동기를 맞추어 DC신호 경로에서 생기는 지연시간을 포함한 RF신호의 실제 상승시간 및 하강시간을 측정하였다. 그림 14는 측정된 상승시간 및 하강시간을 보여준다. 각각 64 nsec와 130 nsec를 얻었다.

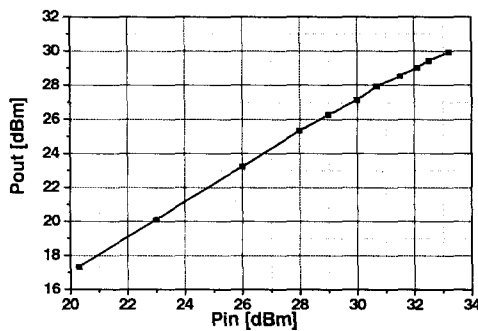
본 스위치모듈은 전기적 성능뿐만 아니라 일련의 환경시험을 통과해야만 한다. 따라서 고온, 저온, 습도, 진동, 충격 등의 시험에서 통과할 수 있게 고온에서 변형이 되지 않는 에폭시를 사용하였고, hermetic 콘넥터를 사용하여 밀봉이 되도록 하였다. 환경시험에서도 습도, 고온, 저온, 진동, 충격 등의 시험을 거친 후에도 여전히 전기적 특성이 요구된 사양을 만족하였다. 그 중에서도 그림 15는 SP8T

그림 12. SP8T의 RF 모듈 특성  
Fig. 12. RF characteristics of SP8T module.

스위치모듈의 고온시험 전·중·후의 삽입손실을 측정한 것이다. 실험은 125°C chamber에서 96시간 동안 in-situation으로 24시간에 한번씩 총 3회 측정



(a) SP3T



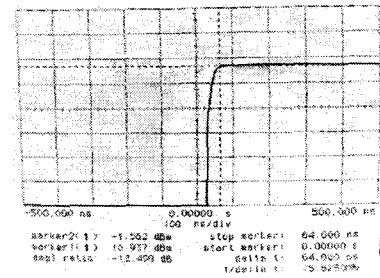
(b) SP8T

그림 13. 두 스위치 모듈의 최대입력전력  
Fig. 13. The maximum input power of the modules.

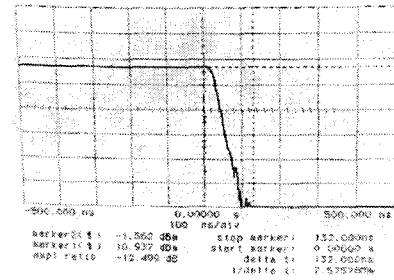
한 결과가 125°C에서의 특성이며 나머지 두 경우가 chamber에 넣기 전·후에 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 6~18 GHz에서 약간 변화가 있으나 여전히 주어진 요구사항을 만족하는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

통신 및 전자전 장비에 널리 사용되는 부품 중의 하나인 스위치 모듈을 자체 개발한 GaAs PIN 다이오드와 MMIC chip을 이용하여 순수한 국내 기술로 개발하였다. 개발된 SP3T와 SP8T 스위치 모듈의 삽입손실은 각각 2.8 dB와 4.2 dB 이하의 값을 얻었고, VSWR과 분리도는 둘 다 2.0:1 이하와 55 dB 이상을 만족하였다. 또한 내장된 구동회로를 사용하여 고속 스위칭이 가능하도록 하였다. PIN 다이오드의 에피구조를 개선하여 입력전력 2 W 이상에서도 동작 가능하도록 하였다. 제작된 2가지 스위치 모듈은 요구되는 환경시험을 만족함으로써 제품화하여 실



(a) 상승시간  
(a) Rising time.



(b) 하강시간  
(b) Falling time.

그림 14. 스위치 모듈의 스위칭 속도  
Fig. 14. Switching time of the modules.

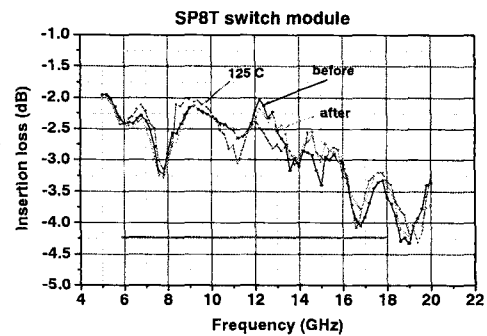


그림 15. 고온시험 측정결과(삽입손실)  
Fig. 15. Results of high temperature test(insertion loss).

제 시스템에 적용할 예정이다.

#### 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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

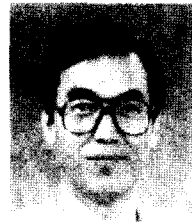
정 명 득



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, 능동 위상 배열 시스템

박 동 철



1974년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)  
 1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)  
 1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)  
 1976년~현재: 충남대학교 공과대학 전파공학과 교수

1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany, 방문교수

1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson

1998년~현재: IEEE EMC Korea Chairperson

2000년~2001년: 한국전자과학회 회장

[주 관심분야] Microwave and millimeter-wave, passive devices, EMC/EMI topics and antenna

이 경 학



1999년 1월: 진주 연암공업대학  
 1999년 1월~현재: LG전자기술원 근무  
 [주 관심분야] 초고주파 모듈 조립, 마이크로파 소자