

위성통신용 MSM을 위한 흡수형 SPST MMIC 스위치의 설계 및 제작

Design of Absorptive Type SPST MMIC Switch for MSM of Satellite Communication

염인복 · 류근관* · 신동환 · 이문규** · 오일덕* · 오승엽***

In-Bok Yom · Keun-Kwan Ryu* · Dong-Hwan Shin · Moon-Que Lee** · Il-Duck Oh* · Seung-Hyeub Oh***

요 약

위성통신 시스템의 초고주파 스위치 매트릭스(MSM)를 위한 MMIC 스위치 칩을 InGaAs/GaAs p-HEMT 공정을 이용하여 설계 및 제작하였다. MMIC 스위치는 on과 off 상태에서 우수한 입출력 반사계수를 위해 흡수형으로 설계되었다. 또한, 스위치 칩의 크기를 줄이기 위해 MIM 커패시터와 spiral 인덕터의 집중소자를 이용하여 3 GHz 대역에서의 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 구현하였다. 설계된 MMIC 스위치는 3.2~3.6 GHz 대역에서 사용할 수 있으며 1.6 mm×1.3 mm의 칩 크기를 갖는다. On-wafer 측정 결과, 2 dB 이하의 삽입 손실과 56.8 dB 이상의 격리도 특성을 나타내었다. 이와 같은 측정 결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것이다.

Abstract

A MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) switch chip using InGaAs/GaAs p-HEMT process has been designed for MSM(Microwave Switch Matrix) of satellite communication system. An absorptive type MMIC switch is adopted for good reflection coefficients performances of input and output ports at both on and off states. And, a quarter wavelength impedance transformer is realized with lumped elements of MIM capacitor and spiral inductor for 3 GHz band to reduce the chip size. This MMIC switch covers the frequency range of 3.2~3.6 GHz. According to the on-wafer measurement, the fabricated MMIC switch with miniature size of 1.6 mm×1.3 mm demonstrates insertion loss below 2 dB and isolation above 56.8 dB, and the performance coincides with simulation results.

Key words : MMIC, Switch, SPST, Absorptive, MSM

I. 서 론

상업용 무선통신 시스템의 발전과 더불어 초고주파 회로의 기술도 급속하게 발전하고 있으며, 회로의 크기 또한 점점 작아지고 있다. 스위치는 통신 시스템에서 RF 신호의 흐름을 제어하는 중요한 소자

중의 하나이다. 이에 따라 최근에는 초고주파용 송수신기를 위한 다양한 스위치 회로에 관한 논문들이 발표되고 있다^{[1]~[4]}.

초고주파용 스위치 회로는 주로 PIN 다이오드와 FET를 이용하여 설계된다. PIN 다이오드 스위치는 삽입 손실, 격리도, 신호 왜곡 및 전력 취급 면에서

한국전자통신연구원 광역무선기술연구그룹(Global Area Wireless Technology Research Group, ETRI)

*한밭대학교 전기전자제어공학부(Dept. of Electrical, Electronics & Control Engineering, Hanbat National University)

**서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부(Dept. of Electrical & Computer Engineering, University of Seoul)

***충남대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20050726-080

· 수정완료일자 : 2005년 9월 7일

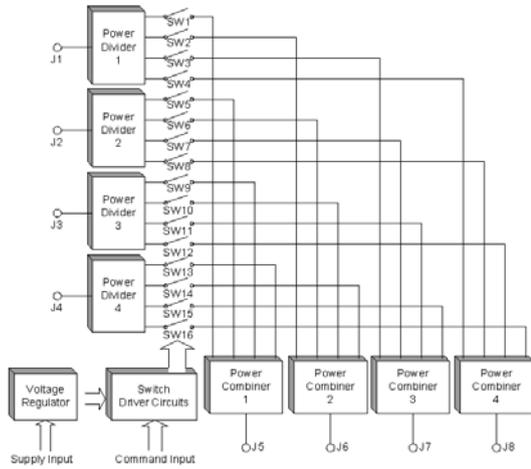


그림 1. 스위치 매트릭스의 기능도
Fig. 1. Functional block diagram of switch matrix.

우수한 특성을 갖는다. FET를 이용한 스위치의 경우 RF 대역에서 밀리미터파 대역까지 PIN 다이오드 스위치와 비슷한 특성으로 사용될 수 있을 뿐 아니라 낮은 소비전력 및 고속 스위칭의 장점을 갖는다^[4].

본 논문에서는 위성 통신 시스템의 초고주파 스위치 매트릭스(MSM)를 위한 초소형 스위치를 MMIC로 설계 및 제작하였다. 그림 1은 위성통신 시스템의 4x4 스위치 매트릭스의 기능도를 나타내고 있으며 동작 주파수 범위는 3.2~3.6 GHz이다. J1~J4는 RF 입력단자를 J5~J8은 RF 출력단자를 각각 나타낸다. 위성통신 시스템의 스위치 매트릭스는 18 dB 이하의 전체 삽입 손실 및 55 dB 이상의 격리도가 요구되고 있다. 이득 budget에서 각각의 power divider는 4 way로 이상적인 경우 전체 12 dB의 신호감쇠가 발생하며, 3.5 dB 정도의 전체 스위치 매트릭스 제작 loss를 고려할 경우 개별 스위치는 2.5 dB 이하의 삽입 손실, 55 dB 이상의 격리도 및 우수한 입출력 반사계수가 요구된다.

II. MMIC 스위치 설계

MMIC 스위치는 3.2~3.6 GHz 대역에서 동작하도록 NGST(Northrop Grumman Space Technology)사에서 제공하는 4 mil 기판의 InGaAs/GaAs 0.15 um p-HEMT 공정을 이용하여 설계하였으며 스위치의 on과 off 상태에서 우수한 입출력 반사계수가 요구되

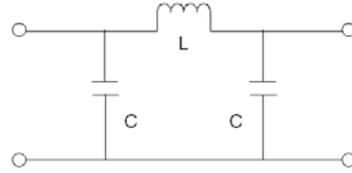


그림 2. $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of quarter wavelength microstrip line.

기 때문에 흡수형으로 설계하였다. 반사형 스위치의 경우 스위치의 on 상태에서는 출력단이 정합되어 있지만 스위치 off 상태의 경우 출력단이 더 이상 정합되어 있지 않기 때문에 주변 스위치 회로의 입출력 특성에 영향을 초래할 수 있다. 이에 비해 흡수형의 경우 스위치의 on과 off 상태에서 항상 입출력 정합 상태를 유지하고 있어 주변 스위치 회로의 입출력 특성에 영향을 주지 않는다. 또한, MMIC 스위치의 크기를 줄이기 위해 3 GHz 대역의 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인을 집중소자를 이용하여 설계하였다. 설계 주파수 영역의 중심 주파수인 3.4 GHz에서 특성 임피던스 50 Ω 인 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인의 길이는 약 7,700 μm 이므로 MMIC 회로 내에서 사용하기에는 곤란하기 때문이다. $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인은 그림 2와 같이 등가회로로 나타낼 수 있으며 커패시턴스와 인덕턴스는 식 (1) 및 (2)로부터 얻을 수 있다^[5].

$$L = \frac{Z_o}{2\pi f_o} [H] \tag{1}$$

$$C = \frac{Z_o}{2\pi f_o Z_o} [F] \tag{2}$$

그림 3은 본 논문에서 설계한 흡수형 MMIC 스위치 구조를 보여주고 있다. 스위칭 소자로 사용되는 4개의 HEMT와 3개의 $\lambda/4$ 마이크로스트립 라인으로 구성되어 있다. 모든 HEMT는 단일 바이어스에 의해 제어되며 SPST(Single Pole Single Throw) 스위치 형태로 설계되었다. 설계에 사용된 HEMT는 NGST(Northrop Grumman Space Technology)사에서 제공하는 InGaAs/GaAs 0.15 um p-HEMT 공정 중 3.2~3.6 GHz의 설계 주파수 대역에서 최적의 삽입 손실 특성을 갖는 4f200을 series 소자(Q1, Q2)로 선택하고 4f300을 parallel 소자(Q3, Q4)로 선택하였다. 또한, 스위치 회로의 시뮬레이션을 위해서 HEMT의 수동

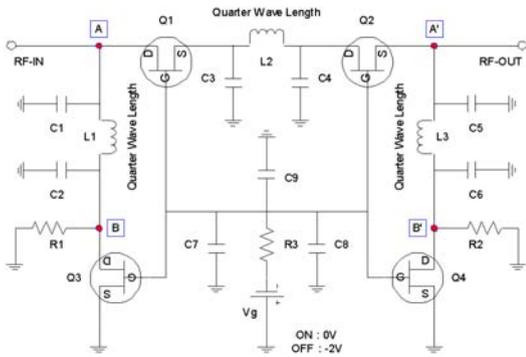
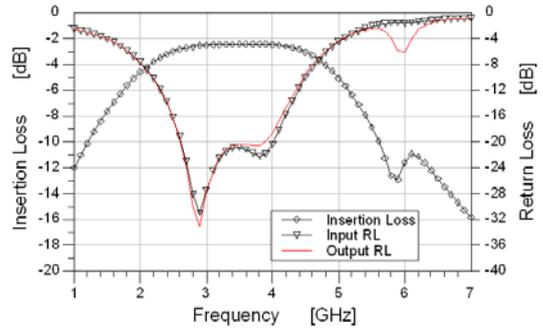


그림 3. 흡수형 MMIC 스위치의 구조
Fig. 3. Configuration of absorptive type MMIC switch.

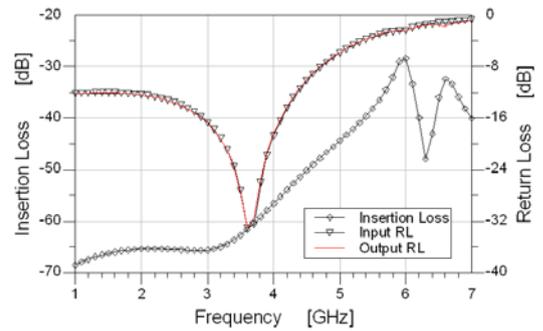
모델(passive model)을 이용하였으며 NGST(Northrop Grumman Space Technology)사의 foundry service에서 제공하는 MIM 커패시터, spiral 인덕터 및 유효 마이크로스트립 라인 폭을 이용한 전송 라인을 스위치 회로 내에 삽입하였다^[6]. 시뮬레이터로는 상용 CAD tool인 ADS2003A를 사용하였다.

그림 3의 흡수형 MMIC 스위치 회로에서 Q1, Q2, Q3 및 Q4 HEMT의 게이트 단자에는 저항 R3을 통해 1 bit의 제어전압 V_g 가 공급되며 커패시터 C7, C8 및 C9는 바이패스용으로 동작한다. 게이트 전압, $V_g = 0$ V가 공급될 때 스위치 회로는 on 상태가 되어, 4개의 HEMT는 8 Ω 정도의 매우 낮은 드레인-소스 임피던스를 갖게 되므로 단락회로로 간주할 수 있다. 이때 B(B')점에서의 임피던스는 R1(R2)과 Q3(Q4)이 병렬관계에 있으므로 Q3(Q4)의 매우 낮은 임피던스에 의해 결정된다. 그리고 A(A')점에서는 C1, L1, C2 및 Q3(C5, L3, C6 및 Q4)의 $\lambda/4$ 파장의 단락스터브로 보이기 때문에 3.4 GHz에서는 매우 높은 임피던스를 갖게 된다. 그러므로 RF-IN 단자와 RF-OUT 단자 사이에는 단락된 Q1, Q2 및 50 Ω 의 마이크로스트립 라인으로 구성되어 있는 것과 같다.

게이트 전압이 HEMT의 핀치-오프 전압 이하인 $V_g = -2$ V가 공급될 때 스위치 회로는 off 상태가 되고, 4개의 HEMT는 1 K Ω 이상의 매우 높은 드레인-소스 임피던스를 갖게 되고 개방회로로 간주할 수 있다. 그림 3에서 B(B')점에서의 임피던스는 R1(R2)과 Q3(Q4)이 병렬관계에 있으므로 R1(R2)의 임피던스에 의해 결정된다. 그리고 A(A')점에서는 C1, L1,



(a) On 상태($V_g=0$ V)
(a) On-state($V_g=0$ V)



(b) Off 상태($V_g=-2$ V)
(b) Off-state($V_g=-2$ V)

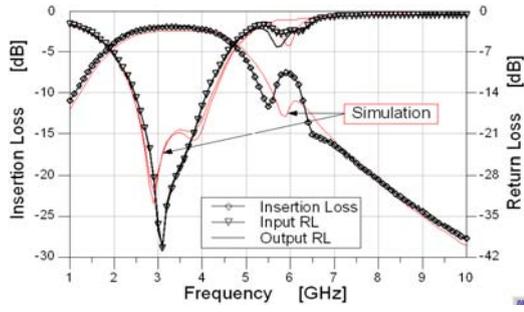
그림 4. 삽입 손실 및 반사계수의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation results of insertion loss and reflection coefficient.

C2 및 Q3(C5, L3, C6 및 Q4)의 $\lambda/4$ 길이를 갖는 부하 R1(50 Ω) 회로로 보인다. 그러므로 RF-IN 단자와 RF-OUT 단자 사이에는 개방된 Q1, Q2 및 50 Ω 의 마이크로스트립 라인으로 구성되어 있는 것과 같다.

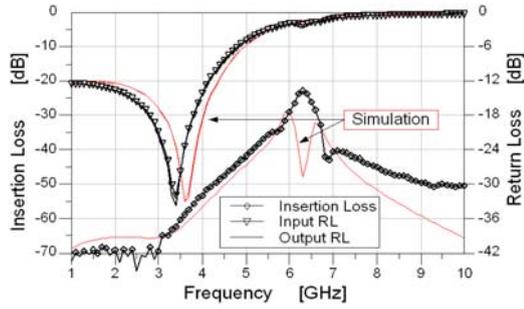
그림 4(a)는 스위치 on 상태에서의 시뮬레이션 결과로서 3.2~3.6 GHz의 주파수 대역에서 -20 dB 이하의 입출력 반사계수 및 2.5 dB 이하의 삽입 손실을 나타내고 있다. 그림 4(b)는 스위치 off 상태에서의 시뮬레이션 결과로서 3.2~3.6 GHz의 주파수 대역에서 -19 dB 이하의 입출력 반사계수 및 61.7 dB 이상의 삽입 손실을 나타내고 있다. 따라서 스위치의 on-off 격리도는 59.2 dB 이상이다.

III. MMIC 스위치 측정 및 고찰

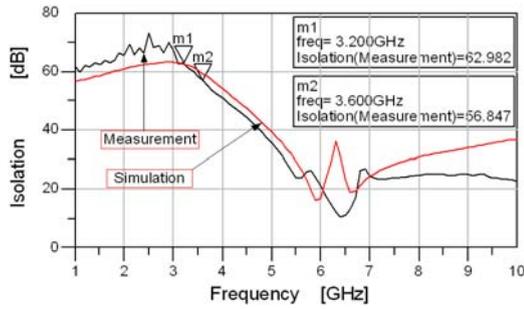
이와 같이 설계된 흡수형 SPST MMIC 스위치는



(a) On 상태 ($V_g = 0$ V)
(a) On-state ($V_g = 0$ V)



(b) Off 상태 ($V_g = -2$ V)
(b) Off-state ($V_g = -2$ V)



(c) 격리도
(c) Isolation

그림 5. 삽입 손실, 반사계수 및 격리도의 측정 결과
Fig. 5. Measurement results of insertion loss, reflection coefficient and isolation.

InGaAs/GaAs 0.15 μm p-HEMT 공정을 이용하여 제작되었다. 제작된 초소형의 MMIC 스위치는 설계 주파수 대역인 3.2~3.6 GHz를 포함한 1~10 GHz 대역에서 on-wafer 측정을 통해 성능이 확인되었다. 그림 5(a)와 (b)는 스위치가 on과 off 상태일 때 삽입 손실

표 1. MMIC HEMT 스위치의 특성

Table 1. Performance of MMIC HEMT switch.

Parameter	Requirement	Measurement
Frequency[GHz]	3.2~3.6	3.2~3.6
Insertion Loss[dB]	<2.5	<2.0
Isolation[dB]	>55	>56.8
S_{11} @ on and off[dB]	<-15	<-25
S_{22} @ on and off[dB]	<-15	<-23
Chip Size[$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$]	1,620 \times 1,300	1,620 \times 1,300

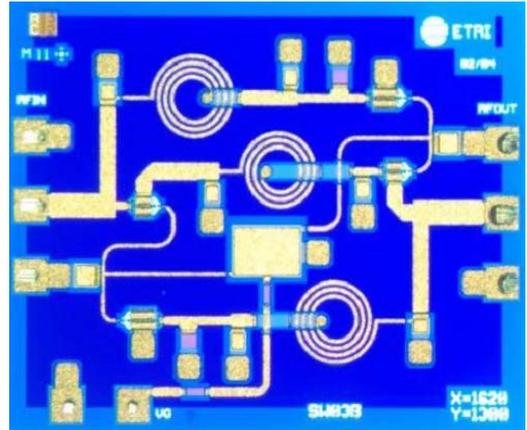


그림 6. MMIC HEMT 스위치의 사진

Fig. 6. Photograph of MMIC HEMT switch.

과 입출력 반사계수 특성을 각각 나타내고 있다. 그림 5(a)는 게이트 전압 $V_g = 0$ V를 인가한 스위치 on 상태에서의 측정 결과로서 응용 주파수 대역에서 2 dB 이하의 삽입 손실과 -25 dB 이하의 입출력 반사계수를 각각 얻었다. 그리고 그림 5(b)는 게이트 전압 $V_g = -2$ V를 인가한 스위치 off 상태에서의 측정 결과로서 58.8 dB 이상의 삽입 손실과 -23 dB 이하의 입출력 반사계수를 각각 얻었다. MMIC HEMT 스위치의 on-off 격리도 측정 결과는 56.8 dB로 우수한 특성을 나타냈으며, 이와 같은 측정 결과는 설계결과와 잘 일치하는 것이다. 표 1은 제작된 MMIC 스위치의 전기적 특성을 나타내고 있으며 설계목표를 모두 만족한다. 그림 6은 제작된 MMIC HEMT 스위치 칩의 사진으로 1.6 mm \times 1.3 mm의 크기를 갖는다.

IV. 결 론

본 논문에서는 위성통신 시스템의 초고주파 스위치 매트릭스를 위한 흡수형 SPST MMIC 스위치를 설계 및 제작하였다. 설계된 MMIC 스위치는 MIM 커패시터와 spiral 인덕터의 집중소자를 이용하여 3 GHz 대역의 $\lambda/4$ 파장의 마이크로스트립 라인을 대체하였으며, 이를 통해 스위치 회로 크기를 2.1 mm² 까지 줄일 수 있었다. 제작된 MMIC 스위치는 위성통신 시스템의 응용 주파수 대역인 3.2~3.6 GHz에서 사용할 수 있으며 2.0 dB 이하의 삽입 손실과 56.8 dB 이상의 격리도 특성을 얻었다. 본 논문에서의 MMIC 스위치 설계 기술은 다양한 상업용, 군사용 및 우주용 시스템의 스위치 설계에서 응용될 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] K. Y. Lin, Y. J. Wang, M. S. Uhm, D. C. Niu, and

H. Wang, "Millimeter-wave MMIC single-pole-double-throw passive HEMT switches using impedance-transformation networks", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 4, pp. 1076-1085, Apr. 2003.
 [2] J. A. Torres, J. C. Freire, "Monolithic transistor SPST switch for L-band", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 1, pp. 51-56, Jan. 2002.
 [3] N. Drozdovski, "SPST switches for satellite communication systems", *IEEE Computers and Communications Symposium*, pp. 360-363, Jul. 1997.
 [4] A. M. Street, "RF switch design, how to design RF circuits", *IEE Training Course*, pp. 4/1-4/7, Apr. 2000.
 [5] S. A. Mass, *Microwave Mixer*, Artech House, Norwood MA, 1992.
 [6] TRW Design Guide.

염 인 복



1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장 교육 참여(영국 Matra Marconi사)

1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 광역무선기술연구그룹 책임임연구원

[주 관심분야] 위성통신중계기, MMIC 회로, 필터 설계

류 근 관



1992년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1994년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학박사)
 2000년 3월~2003년 1월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2003년 2월~현재: 한밭대학교 전기전자제어공학부 조교수

[주 관심분야] 초고주파 능동 및 수동 회로(MMIC, Hybrid MIC) 설계

신 동 환



1996년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 4월~현재: 한국전자통신연구원 광역무선기술연구그룹 선임연구원

[주 관심분야] 위성통신탑재체 시스템 설계, 초고주파 회로(MMIC, Hybrid) 설계

오 일 덕



1968년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
1979년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학박사)
1979년 8월~현재: 한밭대학교 전기전자제어공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 필터 설계, 안테나 설계

이 문 규



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
1999년 3월~2002년 2월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2002년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수

[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동(MMIC, Hybrid) 및 수동 부품회로 설계, (국부)발진기의 비선형 최적 설계

오 승 업



1971년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)
1973년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)
1982년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학박사)
1980년 8월~1981년 8월: 일본 동북대 전기통신연구소 객원연구원

1985년 5월~1986년 5월: 미국 펜실바니아주립대학 객원연구원

1977년~현재: 충남대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 초고주파 능동 및 수동 회로 설계, 안테나 설계