

마이크로웨이브 스위치 매트릭스 용 SPST 스위치 MMIC

정회원 장 동 필*, 염 인 복*, 오 승 업 **

SPST Switch MMIC for Microwave Switch Matrix

Dong-pil Chang*, In-bok Yom*, Seung-hyueb Oh** *Regular Members*

요 약

다중 빔 위성중계기 부품중의 하나인 MSM(Microwave Switch Matrix)에 필요한 SPST 스위치 MMIC를 설계 및 제작하였다. 설계된 스위치 MMIC는 3GHz 대역에서 동작하며, 새로운 구조를 채택하여 기존의 FET 스위치보다 전력 특성과 격리도를 개선하였으며, 스위치의 On/Off 상태에서의 입출력 반사손실 특성이 우수하다. MMIC는 0.15um GaAs pHEMT 공정으로 제작되었으며, 3~4GHz 대역에서 2.0dB 이하의 삽입손실과, 63dB 이상의 격리도 성능을 가지는 것으로 측정되었다. 또한 사용된 단위 pHEMT 소자가 0.2mm Gate Width 임에도 불구하고 32dBm 이상의 OIP3 특성을 가지고 있는 것으로 측정되었으며, 이 결과는 기존의 발표된 FET 스위치에 비해 높은 전력 특성이다.

Key Words : RF Switch MMIC, S-band Switch, Microwave Switch Matrix

ABSTRACT

A SPST Switch MMIC which used for Microwave Switch Matrix(MSM) of communications satellite payload with multi-beam function has been designed and fabricated. New RF FET switch configuration has been devised to improve power characteristics and isolation. Input and output return losses are better than another switches reported previously for both On and Off states. The MMIC chips were fabricated in 0.15um GaAs pHEMT process and measured insertion loss less than 2.0dB and isolation more than 63dB in the frequency range of 3GHz~4GHz. Output 3rd order interceptpoint above 32dBm has been recorded and the value is very high even though the unit pHEMT has gate width of 0.2mm and only four pHEMT are used in the MMIC.

1. 서 론

RF 스위치는 RF 송수신기의 최전단에 설치되어 RF 신호의 송수신을 분리해주거나, 스위치매트릭스 부품의 내부에서 RF 경로를 연결 또는 절체하는 역할을 수행하는 부품이다. 특히 레이더시스템에서는 고출력 증폭기 및 저잡음 수신기와 함께 가장 중요한 부품중에 하나가 RF 스위치라고 할 수 있다^[1]. 또한 최근에는 위성중계기 탑재용 저잡음 주파수 변환기의 보조장치 변환 스위치로서 RF MMIC 스위치를 개발하여 도파관 형태의 기구물 스위치를

대체하는 사례도 발표되고 있다^[2].

본 논문에서는 통신위성중계기 탑재체 부품 중의 하나인 마이크로웨이브 스위치 매트릭스(MSM)의 구성 소자 부품인 SPST(Single Pole Single Throw) 스위치의 GaAs pHEMT 소자를 이용한 MMIC 설계 및 제작에 관하여 기술하고자 한다.

RF 및 Microwave 대역에서 사용하는 스위치는 그 구성 소자에 따라서 PIN Diode 스위치와 FET 스위치로 구분할 수 있다. PIN Diode 스위치는 Diode의 DC Bias를 조정하여 Diode를 ON 또는 OFF 시킴으로서 스위치로서 동작하도록 한다. 이

* 한국전자통신연구원 위성통신RF기술연구팀 (dpjang@etri.re.kr), 논문번호 : KICS2005-10-429, 접수일자 : 2005년 10월 21일

** 충남대학교 전자공학과 (ohseung@cnu.ac.kr)

때 Diode가 ON 되었을 때는 그 수준에 따라서 많은 전류가 요구되어 DC 전력 소모가 필요하다. 특히 본 연구와 관련된 MSM과 같이 여러 개의 스위치가 동시에 동작하는 경우 그에 필요한 DC 전력은 수 Watt에 이를 수 있다. 또한 OFF 상태로 전환하기 위해서는 높은 Reverse Bias 전압이 요구된다. 반면에 FET 스위치는 FET 소자의 Gate 전압 조정으로 FET를 ON 상태와 OFF 상태로 조절할 수 있으며, FET의 특성상 Gate 단자에 전류가 유입되지 않기 때문에 DC 전력 소모가 거의 발생하지 않는다. 또한 최근의 MMIC 기술의 발전으로 높은 Isolation 특성을 가지면서, 재현성이 높은 FET 스위치를 만들 수 있기 때문에 최근에는 FET 스위치의 이용 빈도가 증가하고 있다.

또한 RF 스위치는 그 구조 및 특성에 따라서 흡수형과 반사형 스위치로 나누어질 수 있다. 흡수형 스위치는 입출력 임피던스 정합이 되어 있어서 입출력 반사계수 특성이 우수한 반면, 반사형 스위치는 입출력 임피던스 정합을 고려하지 않고 Isolation 특성에 중점을 두어 설계하게 되는데, 이 경우 Off 상태에서의 반사계수 특성이 좋지 않아서 MSM과 같이 분배기를 이용하여 RF 경로를 분리하여 사용할 경우 Off 상태의 임피던스 부정합에 의하여 RF 특성에 변형이 발생할 수 있다³⁾.

본 연구에서는 ON 상태와 Off 상태에서 모두 반사계수 특성이 우수한 SPST 형태의 pHEMT 스위치를 MMIC로 개발하였으며, 그 결과 1.62mm X 1.62mm의 크기를 가지면서 63dB 이상의 Isolation 특성과 32dBm 이상의 OIP3 특성을 나타내고 있다.

II. SPST Switch 구조

그림 1에 보여진 스위치 구조는 고격리도를 갖는 고전력적인 FET 스위치를 보여주고 있다^{4, 5)}. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 이 스위치는 두개의 직렬형태의 FET와 1개의 병렬접지 형태의 FET를 조합하여 T-형 구조를 가지고 있으며, 3개의 FET가 격리도에 기여하게 된다. 그러나 직렬로 연결된 FET의 경우 On-state에서의 저항 성분에 의하여 삽입손실이 발생하게 된다.

또한 FET의 On-state에서 RF 경로가 연결되기 때문에 FET소자의 전력 특성을 나타내게 되며, 따라서 고전력의 RF 신호를 스위칭하기 위해서는 게이트 폭이 큰 FET를 사용해야 한다. 또한 그림 1의 구조를 갖는 스위치는 Off-state에서 직렬 연결된

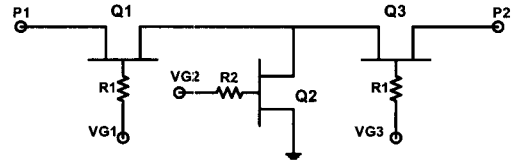


그림 1. 기존의 고 격리도를 갖는 SPST FET 스위치 구조
Fig. 1. Conventional configuration of high isolation SPST FET Switch

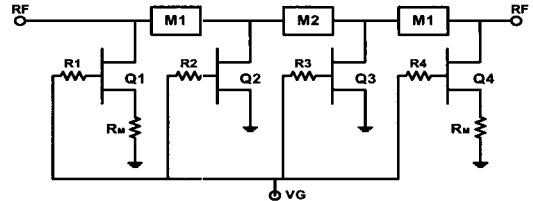


그림 2. 새로운 흡수형 SPST FET 스위치 구조
Fig. 2. Proposed configuration of absorptive SPST FET switch

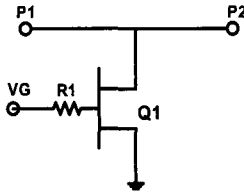
FET가 개방회로로 동작함으로써 스위치의 임피던스 부정합이 발생하여 입출력 VSWR이 매우 높게 나타나므로 흡수형 스위치로 사용될 수 없다. 그리고 그림 1의 스위치를 동작시키기 위해서는 직렬 연결의 FET와 병렬접지 FET의 Gate 전압이 다르게 가해져야 함으로 Bias 회로의 구성이 복잡해진다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 흡수형, 고전력, 그리고 고격리도를 갖는 FET 스위치의 구조를 보여주고 있다. 그림 2의 구조에서 입출력 단자에 연결된 FET의 접지 저항을 적절히 조절하여 RF 신호의 절체 상태에서의 입출력 임피던스 정합을 달성할 수 있다. 그리고 모든 FET가 Off-state 상태에서 RF 연결 상태가 됨으로 스위치의 입출력 전력 특성이 우수하게 나타난다. 또한 그림 1의 구조와 달리 단일 Gate 전압을 이용하여 스위치의 동작을 제어할 수 있으므로 Bias 회로의 구성이 단순해진다. 또한 FET와 FET 사이에 공진회로를 삽입하여 격리도를 높일 수 있다.

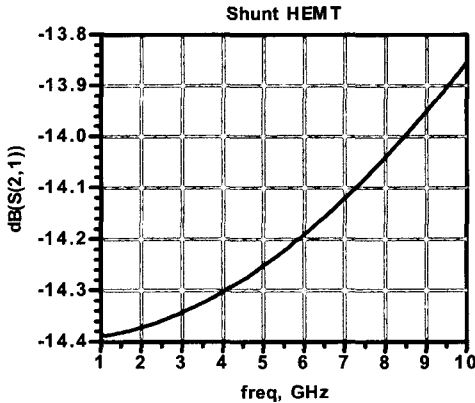
III. MMIC Switch 설계

개발하고자 하는 MMIC 스위치는 3GHz 대역에서 동작하며, 2dB이하의 On-state 삽입손실과, 55dB 이상의 Off-state 격리도를 가져야 하며, 30dBm 이상의 OIP3 특성이 요구된다.

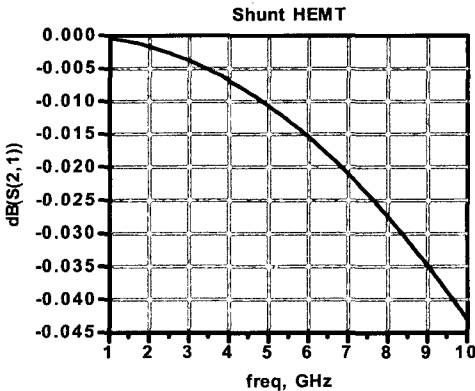
스위치 MMIC 설계를 위하여 0.15um GaAs pHEMT 공정을 사용할 것이며, RF 전력 특성을 고려하여 스위치 구성을 위한 트랜지스터로서 200um Gate width를 갖는 pHEMT로 선정하였다.



(a) FET 스위치 설계를 위한 4F200 pHEMT의 병렬 구조
 (a) Shunt structure of 4F200 pHEMT to design FET switch



(b) 병렬 구조 4F200 pHEMT 의 ON State 특성
 (b) On state characteristics for shunt structure of 4F200 pHEMT



(c) Shunt 구조 4F200 pHEMT 의OFF State 특성
 (c) Off state characteristics for shunt structure of 4F200 pHEMT

그림 3. 4F200 HEMT의 병렬 구조 해석 결과
 Fig. 3. Simulation results for shunt structure of 4F200 pHEMT

그림 3은 선정된 단일 pHEMT의 On-state 와 Off-state에서의 RF 특성을 보여주고 있다.

설계에 사용된 pHEMT의 모델은 passive pHEMT 모델로서 pHEMT의 Drain 전압을 0V로 고정된 상태에서 Gate 전압을 0V와 -2V로 변경하여 RF 특성을 측정하고 이 측정 결과를 pHEMT의 passive 등가모델로 변환하였다.

그림 3-(a)의 병렬 접지 pHEMT를 그림 2의 제안된 구조에 대하여 적용할 때 FET 사이에 있는 M1, M2, M3에 대하여 고려하지 않는다면, 4개의 병렬 접지된 pHEMT를 이용할 경우 3GHz 대역에서 56dB 정도의 격리도가 이론적으로 가능하지만, 입출력 단자에 가까이 연결된 병렬 접지된 2개의 pHEMT는 접지 저항을 가지고 있어, 격리도가 열화 되기 때문에 50dB 이상의 격리도를 구현하기는 불가능하다.

그러나 M1, M2, M3를 대역 통과 공진기로 구현할 경우 격리도를 개선할 수가 있다. 이 때 공진기로서 $\lambda/4$ 전송선로를 이용하여 쉽게 구현할 수 있지만, 주파수 대역이 낮을 경우 길이가 너무 길어 스위치의 크기를 증가시키는 요인이 된다. 여기서 $\lambda/4$ 전송선로 공진기 대신에 그림 4와 같은 π -형 LC 공진기를 사용할 수 있으며, MMIC 회로등에서 인덕터와 커패시터를 쉽게 구현 할 수 있음으로 스위치의 크기를 줄이면서 공진기의 특성을 얻을 수 있다. 하지만 LC 공진기는 삽입손실을 증가시키며, 대역폭이 좁아지는 단점을 가지고 있다.

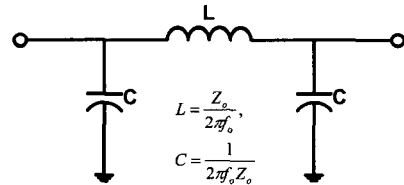


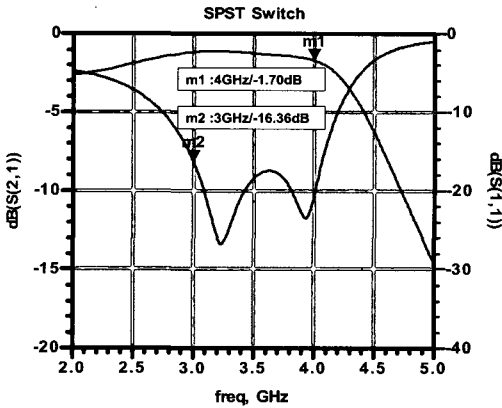
그림 4. $\lambda/4$ 전송선로 공진기와 등가인 π -형 LC 공진기
 Fig. 4. π -type LC resonant circuit equivalent to $\lambda/4$ transmission line resonator

스위치의 설계를 위하여 그림 4의 공진기를 초기 설계한 후 pHEMT 스위치에 삽입하여 L과 C의 값을 조절하면 원하는 대역에서 격리도를 개선할 수 있다. 이 때 대역폭과 삽입손실, 그리고 격리도 등을 동시에 고려하여 L과 C 값을 조절하여야 한다.

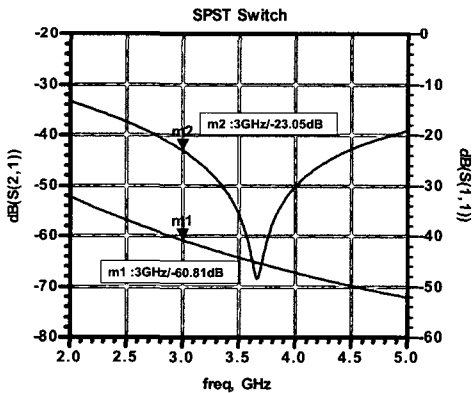
또한 마이크로스트립 회로로 L과 C를 구현해야 함으로 MMIC 회로 설계시 MMIC 제작 공정의 특성을 반영하여 맴돌이형 인덕터와 MIM 커패시터를 설계하여야 한다. 본 연구에서는 맴돌이형 인덕터에 대하여 MMIC 제작공정에서 라이브러리와 되어 있는 표준형 원형 맴돌이 인덕터를 사용하였으며, 이 경우 맴돌이 인덕터의 크기와 회전수가 표준화 되어 있기 때문에 임의의 인덕터를 설계할 수 없는 단점이 있으나, 정확한 측정 결과에 의한 표준 인덕터임으로 설계와 제작 사이의 불일치 오류를 감소

시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 공진기에서 필요로 하는 L 값에 가장 가까운 표준형 인덕터를 선택한 후에, 주변에 마이크로 스트립 전송선로를 추가하여 L 값을 조절하는 방법을 사용하였으며, 이 때 C 값도 동시에 조절하여 공진기를 구현하는 방법을 이용하였다.

설계된 3GHz 대역 FET 스위치는 그림 5와 같은 성능 가질 것으로 시뮬레이션 되었다.



(a) VG=-2V의 스위치 On-상태의 특성
(a) Characteristics of switch On-state under VG=-2V



(b) VG=0V의 스위치 Off-상태의 특성
(b) Characteristics of switch off-state under VG=0V

그림 5. 3GHz대역 SPST FET 스위치의 설계 결과
Fig. 5. Simulated results for the 3GHz-band SPST FET Switch

IV. Switch MMIC의 제작 및 측정

설계된 고 전력, 고 격리도 특성을 갖는 흡수형 SPST 스위치는 0.15 um GaAs pHEMT 공정에서 제작되었다. 이 공정은 우주환경에서 동작하는 MMIC를 제작할 수 있는 시설로서 인증된 공정이며, 본 연구에서 개발된 MMIC 스위치는 추후 인공위성 탑재

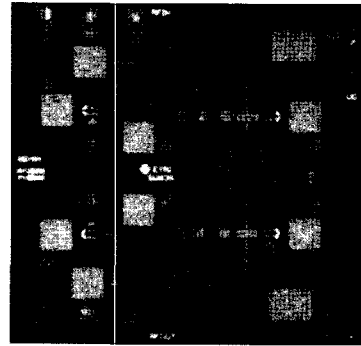


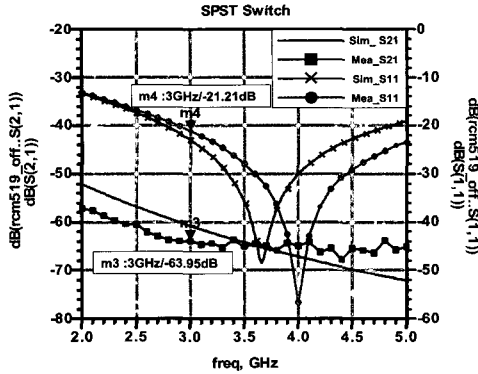
그림 6. 제작된 스위치 MMIC Chip의 사진
Fig. 6. Picture of the fabricated switch MMIC chip

체용 장치에 구성 부품으로 사용되기 위해 우주환경 인증 과정으로 제작 및 측정되었다.

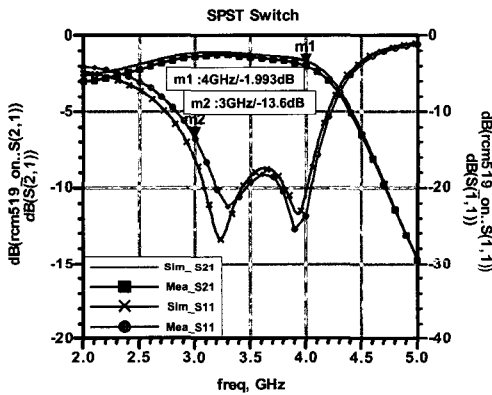
그림 6은 제작된 SPST 스위치 MMIC의 Chip 사진을 보여주고 있다. 제작된 MMIC는 1.62mm X 1.62mm의 크기를 가지며, 두께는 0.1mm이다.

그림 7의 측정된 MMIC 성능을 보면 설계된 스위치는 3~4GHz 대역에서 2.0dB 이하의 삽입손실과 63dB 이상의 격리도 특성을 가지고 있으며, RF 연결상태에서 14dB 이상의 반사손실과 RF 절체 상태에서 20dB 이상의 반사손실의 특성을 가진다. 이 측정된 성능은 그림 7(a)의 설계 결과와 비교한 측정 결과를 분석해 볼 때, 설계 결과에 대하여 100MHz 정도 측정결과와의 주파수 대역이 상향 이동되었음을 알 수 있으며, 이것은 설계 회로에 MIM 커패시터 값 10% 감소시켰을 경우의 결과와 유사했다. 따라서 공정상의 MIM 커패시터 공정변화에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단되며, 그림 7(b)의 Off-state의 특성에 대하여는 pHEMT의 모델의 MMIC 공정에 따른 변화가 추가되어 측정결과가 시뮬레이션에 비하여 300MHz 정도 변화한 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 설계결과와 제작후 측정결과가 매우 유사하다고 할 수 있다.

제작된 스위치의 입력력 반사손실 특성을 검토해 볼 때 Off-state에서의 반사손실이 On-State에서의 반사손실 보다 우수함을 알 수 있으며, 이것은 pHEMT사이 에 삽입된 공진기의 특성에 의한 것으로 공진기가 On-State에서 대역 통과 특성을 나타내기 때문에 발생한다. 일반적인 흡수형 스위치의 반사손실 특성이 광대역 특성을 가지는 경우 주파수 상승에 따라 격리도 특성이 급격히 감소하는 특성을 가지지만⁶⁾, 본 논문에서 개발된 스위치의 경우 2GHz 이상의 대역에서 격리도가 60dB 이상 유지되는 특성을 가지고 있으며, 이것은 스위치의 설



(a) 스위치 On-State 측정 결과
(a) Measured result of the switch under On-state



(b) 스위치 Off-State 측정 결과
(b) Measured result of the switch under Off-state

그림 7. 제작된 스위치 MMIC의 S-parameter 측정 결과
Fig. 7. Measured S-Parameter of the fabricated MMIC

계시 스위치의 크기를 최소화하면서 동시에 높은 격리도를 달성하기 위해 공진기를 Off-state에 최적화한 결과이다.

본 논문에서 제시된 스위치 MMIC는 비교적 작은 크기의 pHEMT 소자를 사용하였음에도 불구하고 그 구조상 높은 OIP3 특성이 기대되었으며 제작된 스위치는 32dBm 이상의 OIP3 특성을 가지는 것으로 측정되었다. 이것은 스위치의 내부에 직렬 연결된 FET가 존재하는 구조에서 보다 20dBm 이상 높은 값이다. 참고로 본 연구와 동시에 설계 및 제작된 직렬 연결 pHEMT를 가지는 스위치 MMIC의 경우 pHEMT의 크기가 1.5배임에도 불구하고 OIP3는 15dBm 정도 이었다^{7, 8)}. 그림 8에는 측정된 Switch MMIC의 IMD3 특성 그래프를 보였다.

제작된 스위치 MMIC Chip의 총 수량은 726개이었으며, 이중 699의 Chip이 성능을 만족하고 있어 MMIC의 성공율은 97%로서 설계된 회로가 매

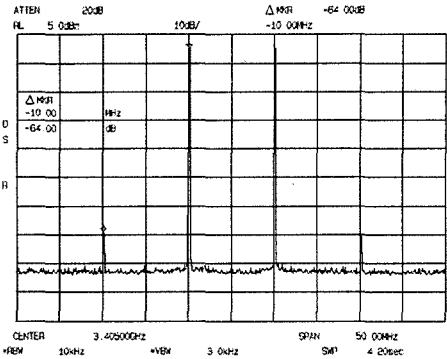


그림 8. 제작된 스위치 MMIC의 IMD3 측정 결과
Fig. 8. Measured IMD3 Result of the fabricated MMIC

우 안정적이라고 판단된다.

V. 결론

본 논문은 통신위성에 탑재될 3GHz 대역 MSM (Microwave Switch Matrix)용 흡수형 SPST pHEMT 스위치 MMIC의 설계 및 제작 결과에 대하여 기술하였다. 설계된 스위치 MMIC는 3~4GHz 대역에서 2.0dB 이하의 삽입손실과 63dB 이상의 격리도 성능을 가지며, ON/OFF State에서 모두 14dB 이상의 우수한 반사손실 특성을 나타내고 있다. 설계된 스위치는 pHEMT 소자를 이용하여 설계되어 DC 소모 전력이 없는 장점을 가지고 있으며, 동시에 흡수형으로 설계하여 스위치의 절체 상태에서 20dB 이상의 반사손실을 가지고 있어 MMIC의 사용상의 유연성을 향상 시켰다. 또한, 단일 전압에 의하여 ON/OFF State를 전환할 수 있어 State 전환을 위한 Control 회로의 구성을 용이하게 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서 제시한 평행 접지 4단 구조의 FET 스위치는 OIP3 성능 측정 결과 32dBm 정도의 결과를 얻음으로써 사용된 단일 pHEMT의 크기가 0.2mm임을 감안할 때 아주 우수한 결과로 평가되어, MSM 개발에 있어 장점으로 작용 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] Yalcin Ayasli, "Microwave switching with GaAs FETs", *Microwave Journal*, pp. 61~74, Nov. 1982.

- [2] Fred C. Tramm, "Compact Frequency Converter for Ka-band Telecommunications Satellite Payload", *AIAA 20th Conferenc on Satellite Systems*, pp.1893~1896, May, 2002.
- [3] Liam Devlin, "The Design of Integrated Switches and Phase Shifters", *Design of RFICs and MMICs(Ref. No. 1999/158)*, *IEE Tutorial Colloquium 24*, pp.2/1-2/14, Nov. 1999.
- [4] Nobuaki Imai, et al., "Novel High-Isolation FET Switches," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, pp.685-691, No.5, May 1996.
- [5] J.A. Torres, et. al., "Monolithic transistor SPST switch for L-band", *IEEE Trans. on MTTs*, vol.50, Issue 1, pp.51~56, Jan. 2002.
- [6] B. Khabbaz, et. al., "A GaAs DC-20 GHz SPDT absorptive switch", *University/Government/Industry Microelectronics Symposium*, 1989. *Proceedings*, pp.165~167, June 1989.
- [7] K.K. Ryu, et al, "MMIC HEMT Switch for Switch Matrix of Satellite Communication System", *Microwave Symposium Digest, 2005 IEEE MTT-S International*, pp.2007~2010, June 2005.
- [8] In-Bok Yom, et al, "Design of an absorptive MMIC switch for satellite communication system" *Microwave and optical technology letters*, Vol. 46, No. 4, pp.370~371, August 20, 2005

장 동 필 (Dong-pil Chang)

정회원



1992년 2월 충남대학교 전자공학과 졸업

1994년 2월 충남대학교 전자공학과 석사

1994년 2월~현재 ETRI 선임연구원

<관심분야> 초고주파 부품 설계, MMIC 설계, 밀리미터파대역 부품 및 시스템 개발

염 인 복 (In-bok Yom)

정회원



1990년 2월 한양대학교 전자공학과 졸업

2003년 2월 충남대학교 전자공학과 석사

1994년 2월~현재 ETRI 팀장, 책임연구원

<관심분야> 초고주파 부품 설계, MMIC 설계, 밀리미터파대역 부품 및 시스템 개발

오 승 엽 (Seung-hyeup Oh)

정회원



1971년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업

1973년 2월 연세대학교 전기공학과 석사

1982년 2월 연세대학교 전기공학과 박사

1980년 8월~1981년 8월 일본 동북대 전기통신연구소 객원연구원

1985년 5월~1986년 5월 미국 펜실바니아주립대학 객원연구원

1977년 현재 충남대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 초고주파 부품 및 안테나, 이동통신, 마이크로파대역 시스템