

K-Band용 Semi-MMIC Hair-pin 공진 발진기

정희원 이현태*, 이종철*, 김종현*, 김남영*, 김복기*, 홍의석*

A Semi-MMIC Hair-pin Resonator Oscillator for K-Band Application

Hyun-Tae Lee*, Jong-Chul Lee*, Jong-Heon Kim*, Nam-Young Kim*, Bok-Ki Kim*,
Ui-Seok Hong* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 기본파를 억제시키고 2차 고조파가 주 발진신호로 동작되는 18 GHz 대역의 push-push 발진기를 semi-MMIC 형태로 설계 및 제작하였다. 마이크로스트립 선로를 포함하는 passive component는 semi-insulating GaAs 기판 위에 MMIC 공정을 이용하여 구현하고, Chip 형태의 P-HEMT, 저항, 캐패시터를 Au wire-bonding에 의해 연결하였으며, via-hole 대신 접지면을 회로 주변에 구성하여, back-side와 wire-bonding하였다. 실험 결과 -10.5 dBm의 출력 전력 특성을 얻었으며, 기본 주파수 억압은 -17.3 dBc/Hz 의 특성을 보였다. 위상 잡음은 100 kHz offset에서 -97.7 dBc/Hz를 얻었다.

ABSTRACT

In this paper, a 18 GHz oscillator is designed with the push-push method and fabricated by semi-MMIC process, in which the second harmonic is the main output signal with the suppressed fundamental mode. In semi-MMIC process, passive components with microstrip transmission line are implemented using MMIC process on semi-insulating GaAs substrate. Then, chip types of P-HEMT, resistors, and capacitors are connected through Au wire-bonding. Also, the ground plane is inserted around the circuit and connected each other with the back-side of substrate through Au wire-bonding instead of via-hole. The semi-MMIC push-push oscillator shows the output power of -10.5 dBm, the fundamental frequency suppression of -17.3 dBc/Hz, and the phase noise of -97.7 dBc/Hz at the offset frequency of 100 kHz.

I. 서론

최근 초고주파 위성통신 및 개인 휴대통신의 발달과 더불어 그 응용 범위가 밀리미터 영역까지 확장됨에 따라 기존의 하이브리드 방식으로는 마이크

로파 회로의 구현이 불가능해지고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방안으로 단일 초고주파 집적회로(MMIC)^{[1][2]}가 국내외적으로 활발히 연구되고 있다. 그러나 MMIC 개발에는 많은 시간과 막대한 자본이 요구되므로 실제로 대학이나 연구소에서 기

* 광운대학교 RFIC 연구 및 교육센터 / 미션 테크놀로지 연구센터

논문번호 : 00145-0505, 접수일자 : 2000년 7월 24일

* 본 연구는 '98 학술진흥재단의 과학기술기초 중점연구지원사업의 지원(#1998-016-E00033)에 의해 수행된 결과임

* 이 논문은 제25권 8B호에 게재되었으나 편집상의 문제로 인하여 요약문을 정정하여 재게재합니다.

대단كم의 결과를 얻지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 MMIC 개발에 소요되는 시간과 비용을 절감하면서 MMIC 회로가 갖는 장점들을 이용하기 위한 수단으로 Semi-MMIC 공정을 사용한 소자 개발을 제안하고자 한다. 이 공정은 Semi-insulating GaAs 기판을 사용한다는 점에서는 일반적인 MMIC와 동일하지만, MMIC에서 사용되는 MMIC용 능동형 소자나 박막형태(thin-film type)의 저항, 캐패시터, 나선형 인덕터 등을 사용하는 대신 칩 형태로 제공되는 초고주파 능동 소자(MESFET, P-HEMT 등)와 chip 형태의 R, L, C lumped 소자들을 GaAs 기판 위에서 Wire-Bonding 방법을 통해 회로를 구성하게 된다. 본 논문에서는 이러한 semi-MMIC process를 사용하여 K-band의 발진기를 설계 및 제작하였다. MMIC에서는 다층구조를 갖는 마이크로스트립 선로를 이용하지만 본 논문에서는 단일 마이크로 스트립선로를 이용하여 공진기 및 임피던스 정합회로의 수동회로를 구현하였다.

II. Hair-pin 공진기

그림 1에서 병렬 결합된 마이크로스트립 형태의 Hair-pin 공진기를 보여주고 있다. Hair-pin 공진기의 임피던스 Z_p 가 기수 모드(odd-mode) 임피던스이기 때문에 결합된 병렬 마이크로스트립 선로의 단자 1과 단자 2의 전압 분포는 반대 위상 특성을 갖는다. 그러므로 발진기가 Push-push^[3,5] 동작을 할 수 있도록 하는 조건을 제공하게 된다. 이 공진회로는 공진기 역할뿐만 아니라 Push-push 구조에서 두 개의 발진 모듈 사이에 위상기준 역할도 하게된다. 병렬 마이크로스트립 선로는 임의의 길이 θ_c 로 주어지며 길이에 따라 전송 이득에 관계되므로, Hair-pin 공진기와의 결합 길이에 따라 결합계수를 결정하는 중요한 요소가 된다.

그림 2는 Hair-pin 공진기의 전압분포를 나타낸다. 여기서 단자1과 단자2 사이의 θ_s 와 θ_p 의 전압 분포는 서로 반대의 전압 분포를 나타내며 Push-push 발진기의 기본 특성을 만족시킨다. 이 조건에서 각 발진기의 FET는 출력부에서 2차 고조파가 동위상으로 합쳐지게 된다.

III. Push-push 발진기의 설계

Push-push 형태의 발진기는 궤환 회로를 포함한

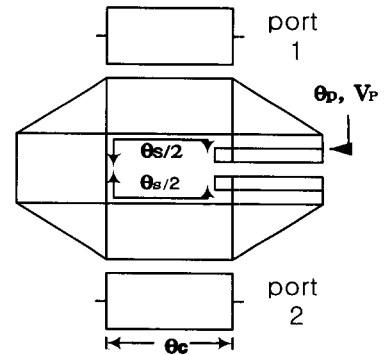


그림 1. 병렬 마이크로스트립과 결합 hair-pin 공진기

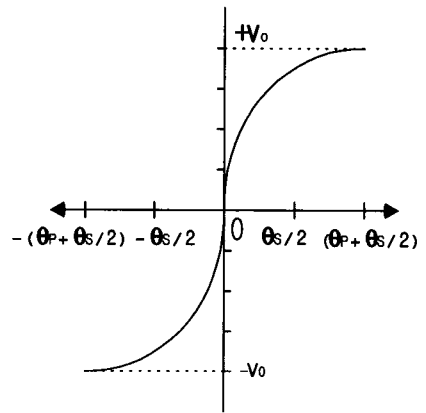


그림 2. Hair-pin 공진기의 전압 분포

능동소자로 구성된 능동부(active mode), 공진기로 구성된 위상기준 공진(resonant phase reference) 회로와 3단자 출력 결합기(Wilkinson power combiner)로 구성된다. 두 발진기의 출력 신호는 위상이 기본파에서 상쇄되고 2차 고조파에서 동위상으로 결합기에서 합쳐지게 된다. 이러한 Push-push 형태의 발진기 구조를 그림 3에 나타내었다.

두 발진기는 특성 임피던스 50 Ω 의 폭을 갖는 마이크로스트립 선로로써 설계되었으며 결합기는 회로가 최대의 출력 전력을 갖도록 Wilkinson 결합기를 사용하였다. 이때 기본파인 9 GHz 와 2차 고조파인 18 GHz에서의 임피던스 정합을 위해 f_0 주파수에서 180° 의 입력선로와 100 Ω 의 isolation 저항이 결합하여 $2f_0$ 의 주파수에서 70.7 Ω 의 90° 선로를 통해 동 위상의 2차 고조파 출력이 결합된다.

능동소자로는 두개의 Filtronic LP1500 p-HEMT chip을 사용하였으며 저항과 캐패시터는 칩형태로 제공되는 소자를 이용하였다. LP1500의 Libra

simulation을 위해 Curtice-Ettenberg Modeling을 이용하여 소자의 파라미터 값을 구하였다. 설계 주파수는 18 GHz 이고 상대 유전율이 13.1인 GaAs 기판에서 설계하였다. 이렇게 설계한 Push-push 발진기의 Layout을 그림 4에서 보여주고 있다.

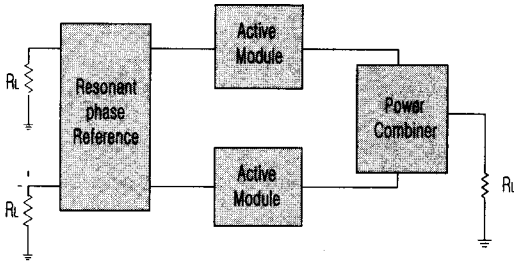


그림 3. Push-push 형태의 발진기 구조

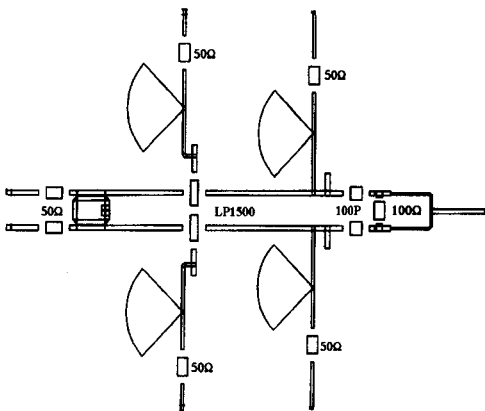


그림 4. Push-push 발진기의 layout

이렇게 설계된 semi-MMIC용 18 GHz Push-push oscillator에 대한 설계 결과를 다음에 표시하였다.

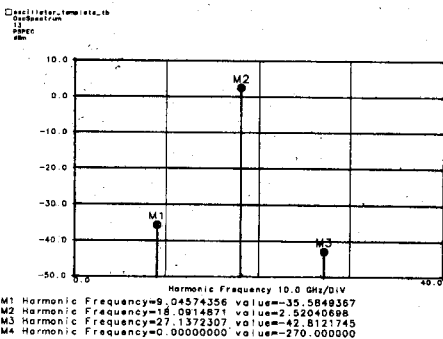


그림 5. 기본파 억압 스펙트럼의 시뮬레이션 값

그림 5에는 기본파와 2차 고조파간에 -37.8 dBc/Hz의 억압 특성 결과를 나타내었고, 중심 주파수 18 GHz에서 2.52 dBm의 출력을 보였다. 그림 6은 발진기의 출력 전압 파형으로 양호한 정현파를 보여주고 있으며, 그림 7에서는 100 kHz offset frequency에서 -129 dBc/Hz의 위상잡음 특성을 보여주고 있다.

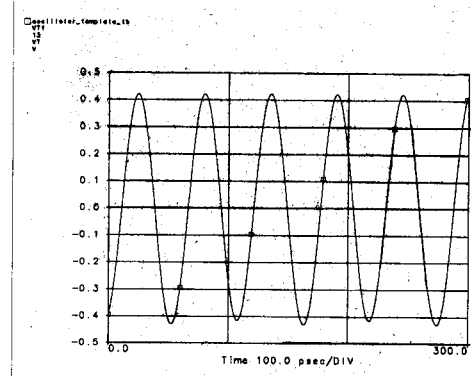


그림 6. 전압 파형의 시뮬레이션 값

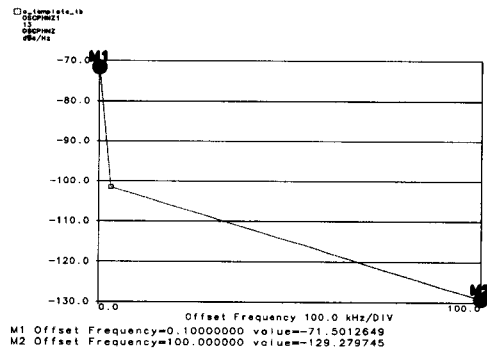


그림 7. 위상잡음 스펙트럼의 시뮬레이션 값

IV. 제작 및 측정

설계된 push-push type 발진기는 일반적인 photo-lithography 방식에 따라 제작되었다. AZ5214 포토레지스트를 2500 rpm으로 30초간 기판위에 도포하고, 98 °C에서 45초간 soft baking, 110 °C에서 50초간 reverse baking한 다음 UV-light에 pre-exposure 5초, flood exposure 15초를 한 다음 AZ developer CD-30에 40초간 development 과정을 거친다. 다음공정은 HCl : H₂O = 1 : 5 etchant에 3분간 oxide wet-etching을 한 다음 thermal

evaporation에 의한 metal 증착을 한다. 이 때 vacuum은 1×10^{-7} torr이었으며, metal thickness는 Ti/Au : 200 Å/10,000 Å이었고, Evaporation rate은 Ti인 경우 1 Å/sec, Au인 경우는 7 Å/sec 이었다. 이렇게 증착된 metal은 acetone-용액에 30분동안 담그는 lift-off process에 의해 원하는 금속 패턴을 얻는다. 기판의 back-side도 비슷한 방법에 의해 접지면을 위한 metalization을 수행한다.

이렇게 제작된 GaAs 기판 위의 마이크로스트립 회로에 p-HEMT chip(Filtronic LP1500), chip-resistor, chip-capacitor들을 Au wire-bonding에 의해 연결한다. 능동소자와 lumped 소자는 500µm 길이의 wire를 bonding하여 연결하였다. 이때 wire 1 개당 0.3 nH의 인덕턴스가 예측되므로 bonding-wire시 인덕터 성분의 최소화를 위하여 2개의 wire를 병렬로 bonding하였다. 본 semi-MMIC 공정에서는 2" 기판 (thickness ~ 350 µm)을 사용하였으며, via-hole process 대신 접지면을 회로 주변에 배열하고, 그 접지면과 기판의 back-side를 Au wire-bonding에 의해 연결해 줌으로써 접지를 해결하였다.

그림 8에는 제작된 semi-MMIC Hair-pin 발진기를 보여주고 있다.

제작된 semi-MMIC K-band push-push 발진기는 on-wafer probe system에서 HP spectrum analyzer를 사용하여 측정하였다. p-HEMT1 과 p-HEMT2 양쪽에 인가된 전압은 모두 5 V 이다. 그림 9는 Push-push 발진기 전대역 스펙트럼을 보여주고 있다. 이때 기본파와 2차 고조파간에 -17.3 dBc/Hz의 억압 특성을 보여주고 있으며 Push-push 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 시뮬레이션의 -37.8 dBc/Hz와 비교해서 억압특성이 크지 않음을 볼수 있다. 그 이유로는 제작상의 오차로 인해 기본

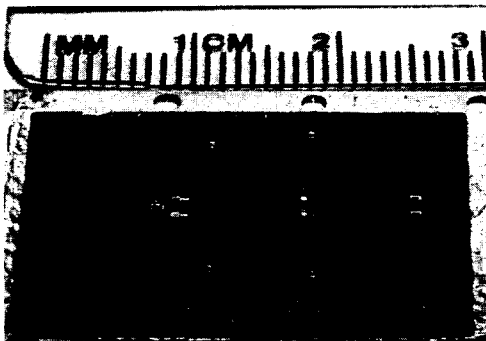


그림 8. Semi-MMIC push-push hair-pin 발진 기의 사진

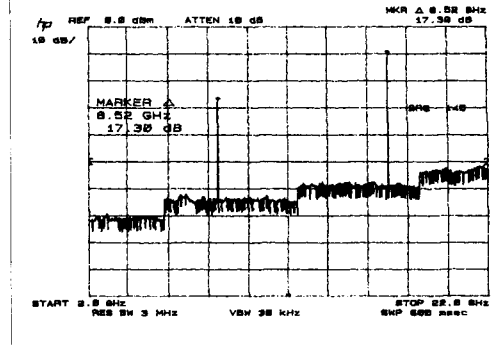


그림 9. 기본파 억압 스펙트럼

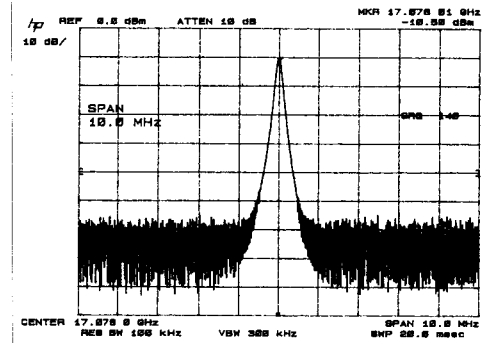


그림 10. 자유 발진 출력 스펙트럼

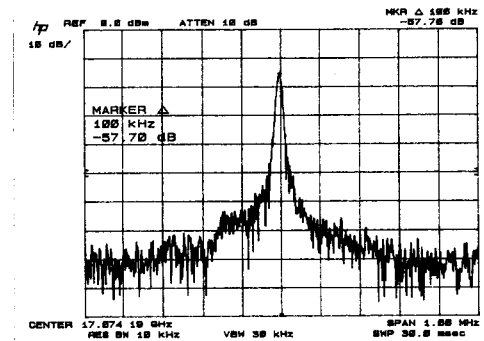


그림 11. 위상 잡음 스펙트럼

파와 2차 고조파간에 정확한 180°의 위상차가 나지 않음으로 사료된다. 그림 10에서는 Push-push 발진기의 자유 발진 출력 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 11에서는 Push-push 발진기의 위상 잡음 특성을 보이고 있으며 -97.7 dBc/Hz의 양호한 특성을 보여 주고 있다. 이 결과로부터 Push-push 발진기가 위상잡음 특성이 우수함을 알 수 있었다.

표1에는 K-band semi-MMIC Push-push 발진기의 설계치와 측정값을 요약 비교하였다. 중심 주파수가 설계치에서 18 GHz이고 측정치에서 17.07 GHz이며 회로의 출력이 설계치에서 2.52 dBm이고 측정치에서 -10.5 dBm으로 차이가 나는 이유로는 process 상의 margin, wire-bonding시 여러 기생 성분의 영향, 특히 접지면의 wire-bonding에 의한 기생 성분, 그리고 cable loss (~ 3 dB)의 영향으로 판단된다. 그밖에 이유로는 반도체 공정상의 오차와 chip 소자의 wire-bonding시 발생하는 기생성분에 대한 고려 미숙, 접지면 연결을 via-hole 대신 기판 위의 접지면과 기판의 back-side를 wire-bonding으로 연결함으로써 발생하는 기생 성분들의 영향으로 판단된다. 또한, chip 형태의 저항, 캐패시터 등을 silver-epoxy에 의해 기판에 집적 시키고 wire-bonding함으로써 발생될 수 있는 기생성분에 인한 것으로 예측된다. 만일 간단한 MMIC 모델링과 공정에 의해 비교적 간단한 공정을 갖는 R, L, C lumped 소자를 마이크로스트립 등으로 구현할 경우보다 개선된 성능향상을 얻을 수 있으리라 기대된다.

표 1. 시뮬레이션 및 측정 결과

| Parameters | Simulation | Measurement |
|-----------------------|-------------|--------------|
| Oscillation Frequency | 18 GHz | 17.07 GHz |
| Output Power | 2.52 dBm | -10.5 dBm |
| Harmonic Suppression | -37.8 dBc | -17.3 dBc |
| Phase Noise | -129 dBc/Hz | -97.7 dBc/Hz |
| Supply Voltage | 5 V | 5 V |

V. 결론

본 논문에서는 Push-push 발진기를 semi-insulating GaAs 기판 위에 수동회로를 마이크로스트립 선로로 구현하고 chip 형태의 p-HEMT, 캐패시터소자를 wire-bonding으로 연결한 semi-MMIC 형태로 제작하였다.

측정 결과 semi-MMIC Push-push 발진기는 100 kHz offset 주파수에서 -97.7 dBc/Hz의 우수한 위상잡음 특성을 보였으며, 향후 VCO 와 PLL에 응용할 경우 적은 비용으로 안정성이 큰 통신 시스템 부품으로 사용할 수 있으리라 예측된다.

감사의 글

본 소자의 제작을 위해 아낌없는 도움을 제공해 주신 동국대 밀리미터파 신기술 연구센터 (MINT ERC)의 이진구 교수님, 이성대 연구원님께 감사드립니다. 또한 소자의 Au wire-bonding을 해주신 Cospace사의 최재혁 과장님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 on-wafer 측정을 위해 많은 도움을 주신 서울대 3차원 밀리미터파 창의연구단의 권영우 교수님, 고원 연구원님께 감사를 드립니다.

또한 귀한 시뮬레이션 Tool (HP EEsof Libra, ADS)을 기증해 주신 Agilent사에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Goyal, *Monolithic Microwave Integrated Circuits : Technology & Design*, Artech House, Inc., pp. 469-546, 1989.
- [2] A. Sweet, *MIC and MMIC Amplifier and Oscillator Circuit Design*, Artech House, Inc., pp. 168-211, 1990.
- [3] E. Holzman, *Solid-State Microwave Power Oscillator Design*, Artech House, Inc., pp. 201-210, 1992.
- [4] A. M. Pavio and M. A. Smith, "A 20-40 GHz Push-Push Dielectric Resonator Oscillator," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 33, no. 12, pp. 1346-1349, Dec. 1985.
- [5] M. Sagawa, K. Takahasi, and M. Makimoto, "Miniaturized Hairpin Resonator Filter and Their Application to Receiver Front-End MICs," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, no. 12, pp. 1991-1997, Dec. 1989.

이 현 태(Hyun-Tae Lee)

준회원



1999년 2월 : 광운대학교
전파공학과졸업

1999년 3월~현재 : 광운대학교
대학원전파공학과
석사과정

<주관심 분야> 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계

이 종 철(Jong-Chul Lee)

정회원



1983년 2월: 한양대학교
전자공학과졸업
1985년 2월: 한양대학교 대학원
전자공학 석사
1989년 12월: 미국 Arizona
State University
전자공학 석사

1994년 5월: 미국 Texas A&M University 전자공
학 박사
1994년 6월~1996년 2월: 현대전자(주)시스템 IC 연
구소 광소개발실 선임연구원
1996년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 전임강사
/ 조교수
1998년 4월~현재: 광운대학교 전파공학과 조교수
<주관심 분야> 초고주파 및 광전자공학, RF MEMS,
밀리미터파 능동 및 수동 소자

김 종 현(Jong-Heon Kim)

정회원

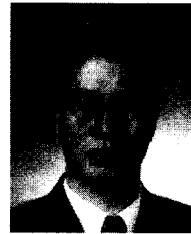


1984년 2월: 광운대학교
전자통신과졸업
1990년 6월: 독일 Ruhr Univ.
Bochum 전자공학 석사
1994년 8월: 독일 Dortmund
전자공학 박사

1995년 4월~현재: 광운대학교 전파공학과 조교수
/ 부교수
<주관심 분야> 초고주파 및 광집적회로

김 남 영(Nam-Young Kim)

정회원

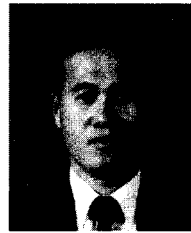


1987년 2월: 광운대학교
전자공학과졸업
1991년 2월: 미국 뉴욕 주립대학
(SUNY at Buffalo)
전자 공학 석사
1994년 2월: 미국 뉴욕 주립대학
(SUNY at Buffalo)
전자공학 박사

1994년 9월~현재: 8월:광운대학교 전자공학과 조교
수 / 부교수
1998년 5월~현재: 광운대학교 RFIC 교육센터 센
터장
2000년 1월~현재: 한국통신학회 학술지 편집위원
<주관심 분야> RFIC, MMIC, ASIC

김 복 기(Bok-Ki Kim)

정회원



1988년 2월: 광운대학교
전자공학과졸업
1991년 5월: 미국 University
of Texas(Austin)석사
1997년 12월: 미국 University
of Texas(Austin) 박사

1998년 3월~현재: 광운대학교 전자공학부 전임강사
/ 조교수
1999년 1월~현재: 한국통신학회 논문지 편집위원
1999년 9월~현재: 한국공학교육인증원 실무간사
<주관심 분야> RF 모듈 및 시스템, RF 네트워크
및 전자장 수치 해석

홍 의 석(Ui-Seok Hong)

정회원

한국통신학회 논문지 제25권 제2A호 참조