

평면회로 기법에 의한 SIW Cavity 공진기를 이용한 X-밴드 발진기

X-Band Oscillator Using SIW Cavity Resonator Based on Planar Circuit Technique

이현욱*
(Hyun-Wook Lee)

이일우**
(Il-Woo Lee)

남 희***
(Hee Nam)

이종철****
(Jong-Chul Lee)

요 약

SIW (Substrate Integrated Waveguide) cavity 공진기의 구조는 유전체기판에 다수의 via-hole 을 이용함으로써 나타낼 수 있으며, rectangular waveguide 와 유사한 특성을 갖는다. 그리고 50-Ω 마이크로스트립라인과 SIW cavity 공진기 중앙간의 결합구조를 통하여 대역저지 특성이 나타나도록 하였다. 이러한 특성을 갖는 SIW cavity 공진기를 이용하여 X-band(9.45 GHz) 발진기를 제작하였고, 위상잡음은 100 kHz offset에서 -98.1 dBc/Hz 로 측정되었다. SIW cavity 공진기는 높은 QL 값을 갖고, 2차원 구조이기 때문에 저비용에 우수한 위상잡음 특성을 갖는 발진기 설계에 응용할 수 있다.

Abstract

The substrate integrated waveguide (SIW) structure can be approximated as the rectangular waveguide using common dielectric substrate with via-holes. To realize reflection-type resonator, 50-Ω microstrip line can be used for coupling with the center plane of the cavity. The oscillator is designed to operate at 9.45 GHz using the reflection-type SIW cavity resonator. The phase noise of oscillator shows -98.1 dBc/Hz at 100 KHz offset. In experiment, the reflection type SIW cavity resonator improves the loaded quality factor making the low phase noise oscillator possible. Due to the entirely planar structure of this resonator, this technique can also be adequate in oscillator applications for a low cost and low phase noise performance.

Key Words : Substrate Integrated Waveguide (SIW), ccavity resonator, coupling structure, oscillator, quality factor

* 주저자 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

** 공저자 : 광운대학교 전자공학과 석사과정

*** 공저자 : 광운대학교 전자공학과 박사과정

**** 공저자 : 광운대학교 전자공학과 교수

† 논문접수일 : 2007년 11월 5일

I. 서 론

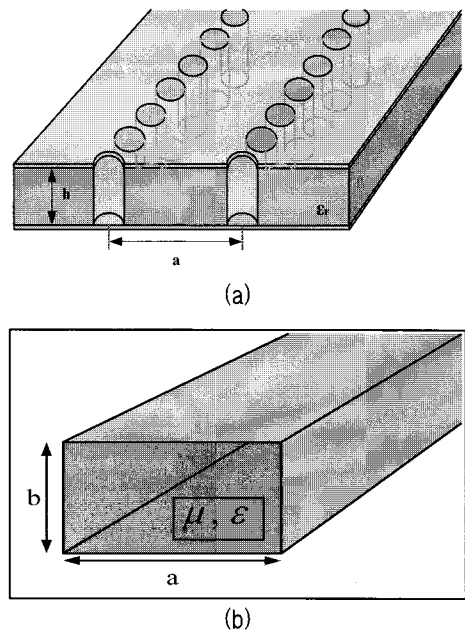
무선통신 시대를 맞이하여 위성통신에 대한 이용 수요가 급격하게 증가하는 추세이다. 따라서 위성통신 산업과 이동통신 개발 기술이 요구되었으며, 다양한 고품질의 서비스를 제공하기 위한 효과적인 운용이 필요하게 되었다. 이를 위해서는 핵심 초고주파 부품개발과 시스템의 뒷받침이 필수적이다. 전송 데이터양이 증가함에 따라 상대적으로 넓은 대역폭을 가지는, 높은 발진 주파수를 필요로 하게 되었고 주파수의 안정도와 위상잡음이 전체 시스템의 데이터 오류 특성에 중요한 영향을 미치므로 우수한 위상잡음 특성을 갖는 발진기가 필수적으로 요구되고 있는 실정이다. 우수한 위상잡음 특성을 위해서는 공진기의 Q 값을 개선시켜야 한다. 그 중 유전체 공진기는 Q 값이 우수하여 발진기에 널리 이용되고 있으나, 3차원 구조를 갖고 있어 회로의 소형화와 다른 회로들과의 집적이 어렵기 때문에[1], 이러한 문제들을 해결하기 위하여 비교적 낮은 Q 값에도 불구하고 평면형 회로와 집적이 용이한 2차원 구조인 마이크로스트립 공진기가 일반적으로 이용되고 있다.

본 논문에서는 우수한 반사 특성을 갖고 동시에 평면회로에 집적이 용이한 9.45 GHz (X-band) SIW(Substrate Integrated Waveguide) cavity 공진기로 이루어진 발진기를 설계하였다. SIW 구조는 평면형 유전체 기판에 다수의 via-hole 을 이용함으로써 rectangular waveguide 와 유사한 특성을 나타내므로 높은 Q 값을 갖는다 [1, 2].

II. SIW Cavity 공진기 및 발진기 설계

SIW cavity 구조를 <그림 1>에 나타내었다. 이는 다수의 via-hole 을 이용하여 하나의 유전체로 채워진 rectangular waveguide 로 근사화 할 수 있다 [2]. SIW 구조에서는 via-hole 의 지름과 각 via-hole 사이의 거리가 회로의 삽입손실과 방사손실에 큰 영향을 미치기 때문에 손실을 줄이기 위해 각각의 via-hole 사이의 거리를 0.2λ 이하로 설계해야 한다

[2]. 일반적인 SIW cavity 구조와 전기장 분포가 <그림 2>와 <그림 3>에 각각 나타나 있다. 일반적인 2-단자 도파관 공진기는 대부분 공진주파수에서 대역 통과 특성을 갖고 있으며, 대역저지 특성을 갖는 도파관 공진기는 급전위치에 따라 민감한 특성을 보이기 때문에 대역저지특성 구현에 어려움이 있다 [3]. 따라서 발진기 설계시 쓰이는 SIW cavity 공진기가 대역저지 특성을 갖도록 50-Ω 마이크로스트립라인과 결합 구조를 갖는 SIW cavity 공진기를 이용하였다. <그림 4>에 50-Ω 마이크로스트립라인과 결합 구조를 갖는 SIW cavity 공진기를 나타내었다.

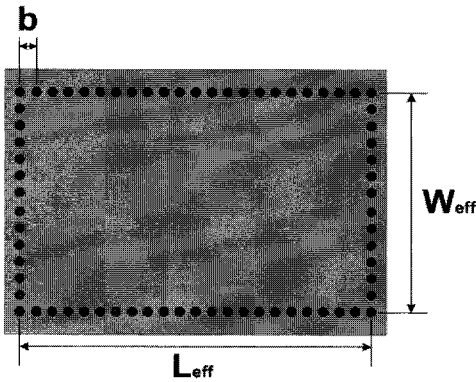


<그림 1> SIW Cavity 와 rectangular waveguide 의 구조 비교 (a) SIW cavity (b) rectangular waveguide
 <Fig. 1> Comparison of The structure of SIW cavity and rectangular waveguide (a) SIW cavity (b) rectangular waveguide

SIW는 기판 집적형 도파관으로 via-hole 을 이용하여 도파관을 구현할 수 있어 일반적인 도파관의 단점 즉, 집적의 어려움을 극복할 수 있다. <그림 5> 는 결합 구조 SIW cavity 공진기의 전기장 분포를 나타낸다 [4]. 전자파가 진행하는 방향 즉, 50-Ω 마이크로스트립라인 중앙으로 부터 수직인 방향으

로 전기장 에너지가 최대인 것을 확인할 수 있다. 공진주파수에서 전자기적 에너지는 SIW cavity 의 via-hole 로 구분되는 metallic wall 내부의 유전체에 저장되고. 이러한 특성을 바탕으로 공진주파수 에서 대역저지 특성을 갖는 SIW cavity 공진기를 설계

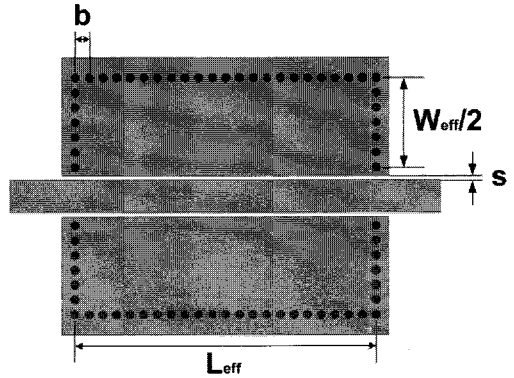
$$F_R(TE_{m0q}) = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{(m/W_{eff})^2 + (q/L_{eff})^2}. \quad (1)$$



<그림 2> 일반적인 SIW Cavity 공진기
<Fig. 2> Typical Structure of a SIW cavity

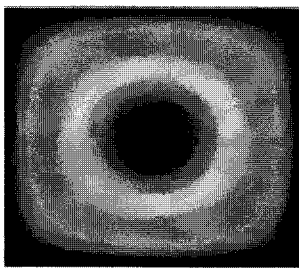
할 수 있다. SIW cavity의 TE₁₀ 모드와 rectangular waveguide 에서의 TE₁₀ 모드 특성은 매우 유사하며, SIW cavity 공진기의 공진주파수는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다[4].

위 식에서 L_{eff} 와 W_{eff} 는 다음 식(2) 로 정의된다.

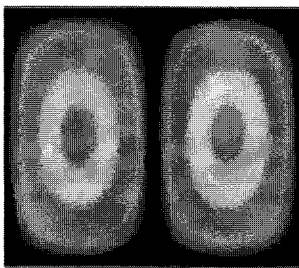


<그림 4> 50-Ω 마이크로스트립라인과 결합구조를 갖는 SIW cavity 공진기

<Fig. 4> Coupling structure of the SIW cavity with 50-Ω microstrip line



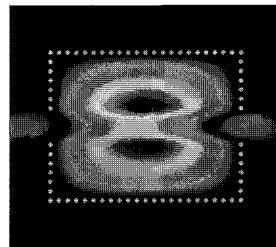
(a)



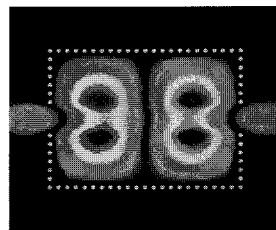
(b)

<그림 3> SIW Cavity 공진기 내부의 전기장 분포 (a) 1모드 (b) 2모드

<Fig. 3> Distribution of electric fields for the SIW cavity (a) mode 1 and (b) mode 2



(a)



(b)

<그림 5> 반사특성을 갖는 SIW cavity 공진기 내부의 전기장 분포 (a) 1모드 (b) 2모드

<Fig. 5> Distribution of electric fields for the reflection-type SIW cavity resonator (a) mode 1 and (b) mode 2

$$L_{eff} = L - \frac{D^2}{0.95b}, \quad (2)$$

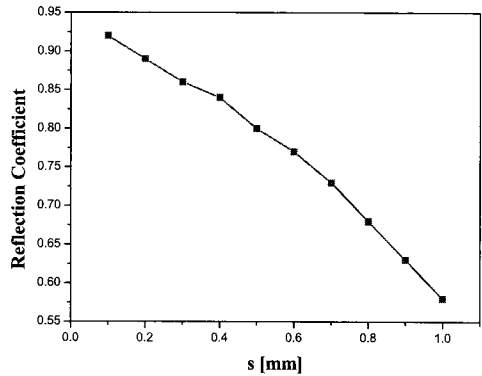
$$W_{eff} = W - \frac{D^2}{0.95b}.$$

식(1)에서 c_0 는 빛의 속도, ϵ_r 은 비유전율, m 과 q 는 모드 지수(mode index). L_{eff} 과 W_{eff} 는 SIW cavity의 크기를 나타낸다. 그리고 식(2)에서 L 과 W 는 같은 공진 주파수를 가지는 rectangular waveguide의 크기, D 는 via-hole의 지름이다. 먼저 9.45 GHz에서 TE₁₀₁ mode를 갖는 rectangular waveguide의 크기를 구한다 [5]. 그 다음 via-hole의 지름을 결정하고, 식(2)를 이용하여 L_{eff} 과 W_{eff} 를 구하여 식(1)로부터 공진 주파수를 구한다. 50-Ω 마이크로스트립 라인과 결합 구조를 갖는 SIW cavity 역시 근사적으로 같은 공진 주파수에서 동작하도록 하기 위해 이것의 폭이 앞서 구한 폭의 절반($W_{eff}/2$)이 되도록 설계하였다 [4].

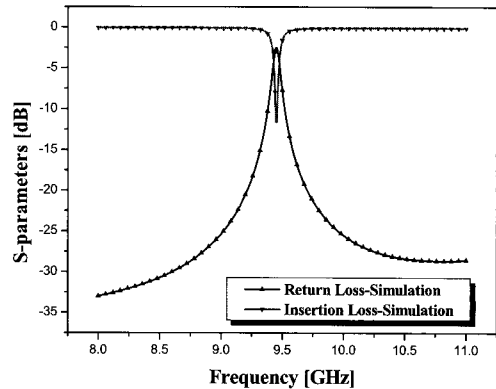
입·출력포트와 급전선 사이에 파워손실이 최소가 되어 반사특성이 향상되도록 SIW cavity 공진기와 급전선로가 임피던스 매칭이 되어야 한다. 이 경우, 반사계수가 1에 가까울수록 특성이 우수하다고 할 수 있다. <그림 6>은 공진 주파수 9.45 GHz에서 50-Ω 마이크로스트립 라인과 SIW cavity 공진기 사이의 거리(s)에 따른 반사계수 값을 나타낸다. s 크기가 작을수록 반사계수가 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 SIW cavity 공진기의 s는 제작 가능성을 고려하여 0.19 mm로 하였으며 각각의 via-hole의 지름은 0.6 mm이고 각 via-hole 중심 간의 거리는 1.18 mm로 설계하였다. <그림 6>에 Ansoft HFSS v.10을 이용하여 SIW cavity 공진기의 모의실험결과를 나타내었으며, 공진주파수인 9.45 GHz에서 삽입손실 12.44 dB, 반사손실 2.48 dB로 나타났다. 반사특성 결과를 이용하여 Q_L (loaded quality factor)를 계산할 수 있으며 다음 식(3)으로 나타낼 수 있다 [6].

$$Q_L = \frac{w_0}{\Delta w}. \quad (2)$$

SIW cavity 공진기의 모의실험결과 Q_L 은 126으로



<그림 5> 공진주파수에서의 s 값에 따른 반사계수
<Fig. 5> Reflection coefficient versus gap size at the resonance frequency



<그림 6> SIW cavity 공진기의 모의실험 결과
<Fig. 6> Simulation results of the SIW cavity resonator

로 계산되었으며 공진기의 크기 및 기관정보를 <표 1>에 나타내었다. 또한, 공진기의 Quality factor가 발진기의 위상잡음 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 식(4)를 통해 알 수 있다 [7, 8].

$$L(\Delta w) = 10 \log \left[\frac{2FkT}{P_{sig}} \left\{ 1 + \left(\frac{w_0}{2Q\Delta w} \right)^2 \right\} \left(1 + \frac{\Delta w_{1/f^3}}{|\Delta w|} \right) \right]. \quad (4)$$

여기서 F는 feedback 발진기의 effective noise figure, P_{sig} 는 carrier signal power, k는 Boltzman 상수, T는 절대온도, Q는 공진기의 quality factor를 각각 나타낸다. 즉, $L(\Delta w)$ 는 반송신호파위에 대한 노이즈 파워의 비로 볼 수 있다. 설계한 발진기 구

조를 <그림 7>에 나타내었다. Series feedback 형태의 발진기 설계시 이용한 SIW cavity 공진기는 FET의 gate 단과 연결되도록 하였으며, bias 회로는 self-bias 회로로 설계하여 전원을 한 개만 사용하도록 하였다 [9].

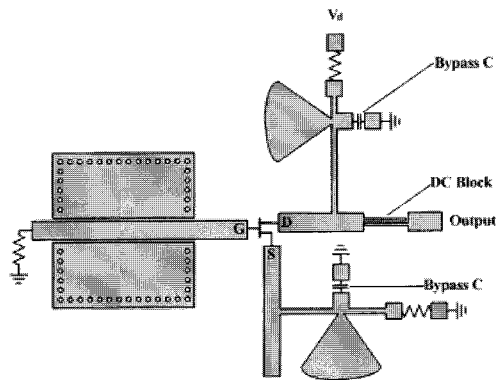
RF Choke는 $\lambda/4$ 마이크로스트립라인과 radial 스텐드 및 바이패스 커패시터로 구성하였다. 소자는 Agilent사의 ATF-13786 GaAs MESFET를 사용하였고, ADS (Advanced Design System) 2006A로 모의실험을 하였다. 비유전율 2.54, 높이 0.54 mm인 teflon 기판에 9.45 GHz에서 발진하도록 회로를 설계하였으며 이는 SIW cavity 공진기의 공진주파수와 일치한다.

III. 발진기 측정 결과

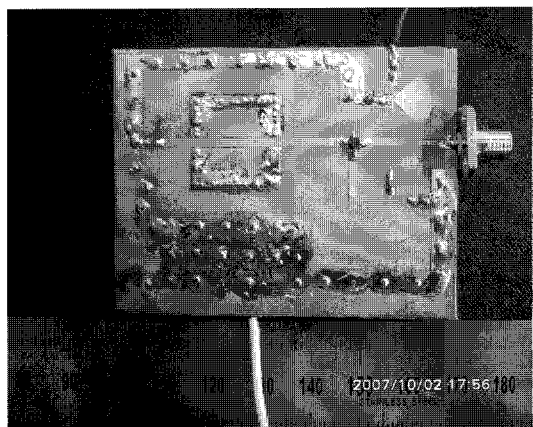
높이 0.54 mm, 비유전율 2.54인 Teflon 기판에 제작된 X-band 발진기가 <그림 8>에 나타나 있으며, Agilent E4440A PSA series spectrum analyzer를 이용하여 측정하였다. $V_{DS} = 3.97\text{ V}$, $I_D = 44.6\text{ mA}$ 에서 측정한 결과, 9.45 GHz에서 출력파워가 13.48 dBm 이고 처음 출력파워와 두 번째 고조파 출력파워의 차이는 34.33 dBc로 나타났으며, 위상잡음은 100 kHz offset frequency에서 98.1 dBc/Hz로 나타났다. 이는 같은 X-band series feedback 발진기에 헤어핀 공진기를 쓴 경우와 비교해 보았을 때 위상잡음이 약 3dB 더 작다는 것을 알 수 있다 <표 2>[10]. 앞서 말했듯이 공진기 성능이 위상잡음 특성에 가장 큰 영향을 미치므로 SIW cavity 공진기가 마이크로스트립 헤어핀 공진기보다 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다. 측정 결과 스펙트럼을 <그림 9>에 나타내었다.

<표 1> SIW 공진기 파라미터
<Table 1> The Design parameters

| Parameters | SIW cavity resonator |
|----------------|----------------------|
| f_0 (GHz) | 9.45 |
| W_{eff} (mm) | 12.16 |
| L_{eff} (mm) | 15.67 |
| b (mm) | 1.18 |
| D (mm) | 0.6 |
| s (mm) | 0.19 |
| ϵ_r | 2.54 |
| h (mm) | 0.54 |



<그림 7> 직렬피드백형 X-band 발진기의 구조
<Fig. 7> Schematic view of an X-band oscillator circuit with the series feedback topology



<그림 8> 실제 제작한 SIW cavity 공진기를 이용한 발진기
<Fig. 8> Photograph of the fabricated 9.45 GHz oscillator with the SIW cavity resonator

<표 2> SIW cavity 와 헤어핀 공진기 성능 비교
 <Table 2> The comparison SIW cavity with hairpin resonator

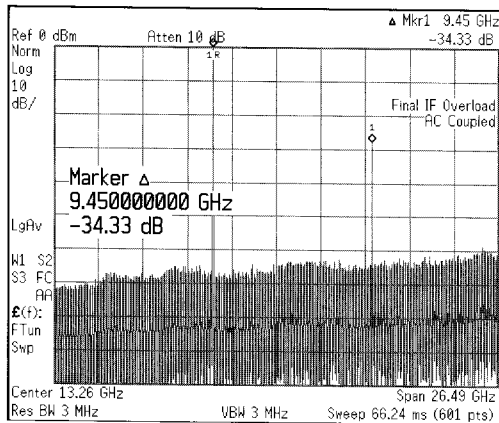
| Osc. | Using SIW cavity resonator ($V_{DS}=3.97$ V, $I_D=44.6$ mA) | Using hairpin resonator ($V_{DS}=2.93$ V, $I_D=42.4$ mA) |
|------------------------------|--|---|
| Oscillation frequency | 9.45 GHz | 9.174 GHz |
| Q_L (Simulation) | 126 | 115 |
| Output power | 13.48 dBm | 9.78 dBm |
| Second harmonic suppression | -34.33 dBc | -36.60 dBc |
| Phase noise (100 kHz offset) | -98.1 dBc/Hz | -95.32 dBc/Hz |

IV. 결 론

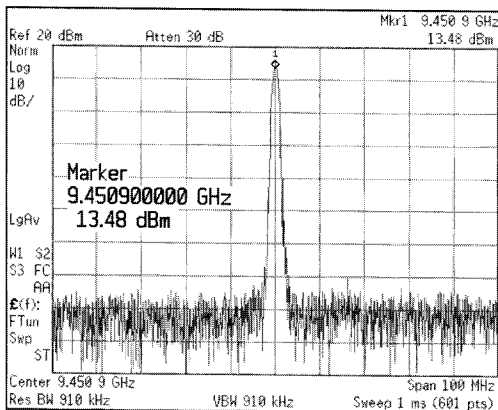
본 논문에서는 SIW cavity 공진기를 이용하여 X-band 발진기를 설계하였다. SIW cavity 공진기는 3차원구조인 rectangular waveguide 와 유사한 특성을 나타내므로 높은 QL 값을 가지며, 2차원 형태로 구현함으로써 집적도를 향상시켰다. 이를 이용해 발진기를 제작함으로써 평면회로에 집적이 용이하다는 것을 검증함과 동시에 위상잡음특성 또한 비교적 우수하다는 것을 입증하였다. Substrate 면적을 다소 많이 차지한다는 단점을 더 연구하여 보완한다면 회로의 소형화, 고집적화, 고성능화를 이루는데 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

참고문헌

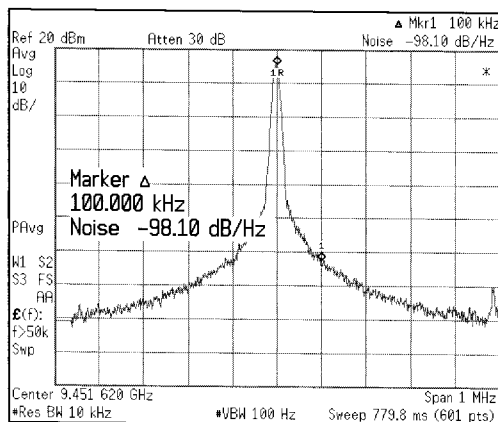
- [1] P. G. Wilson and R. D. Carver, "An easy-to-use FET DRO design procedure suited to most CAD programs," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1033-1036, June 1989.
- [2] D. Deslandes and K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 593-596, Feb. 2003.
- [3] D. Deslandes and K. Wu, "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE*



(a)



(b)



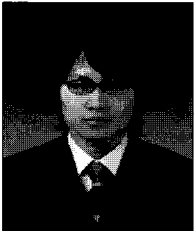
(c)

<그림 9> 발진기 측정 결과 (a) 2차 고조파 억압 (b) 출력파워 (c) 위상잡음특성

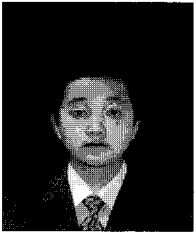
<Fig. 9> Measurement results of the oscillator (a) second harmonic suppression (b) output power level (c) phase noise characteristic ($V_{DS}=3.97$ V, $I_D=44.6$ mA)

- Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 68-70, Feb. 2001.
- [4] Y. Cassivi, L. Perregriani, P. Arcioni, M. Bressan, K. Wu, and G. Conciauro, "Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide," *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 333-335, Sept. 2002.
- [5] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [6] A. P. S. Khanna and Y. Garault, "Determination of loaded, unloaded, and external quality factors of a dielectric resonator coupled to a microstrip line," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 31, no. 3, pp. 261-264, Mar. 1983.
- [7] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum," *Proc. IEEE*, vol. 54, pp. 329-330, Feb. 1966.
- [8] G. D. Vendelin, A. M. Pavio, U. L. Rohde, *Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques*, Wiley Interscience, 1990.
- [9] G. Gonzalez, *Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design*, 2nd ed., Prentice Hall, 1997.
- [10] S. W. Seo, H. Y. Jung, J. H. Jeong, and C. H. Park, "Design of an X-band oscillator using novel miniaturized microstrip hairpin resonator," *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, vol. 3, pp. 943-946, Dec. 2007.

저자소개



이 현 옥 (Lee, Hyun-Wook)
 2007년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2007년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정



이 일 우 (Lee, Il-Woo)
 2006년 2월 : 서경대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2006년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 석사과정



남 희 (Nam, Hee)
 2003년 2월 : 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2006년 8월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
 2007년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 박사과정



이 중 철 (Lee, Jong-Chul)
 1983년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1985년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
 1989년 12월 : Arizona State Univ. EE Dept. (공학석사)
 1994년 5월 : Texas A&M Univ. EE Dept. (공학박사)
 1994년 6월 ~ 1996년 2월 : 현대전자 광소자 개발실 (선임연구원)
 1996년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 교수

사 진