

평면형 MMIC 공진기를 이용한 낮은 위상잡음을 갖는 X 대역 MMIC 발진기

An X-band Low Phase Noise MMIC Oscillator Using a Planar-Type MMIC Resonator

이문규* 조일현** 최종원**
(Mun-Gyu Lee) (Il-Hyeon Jo) (Jong-Won Choe)

요 약

본 논문에서는 평면형 MMIC 공진기를 이용하여 X대역에서 동작하는 낮은 위상잡음 특성의 HBT 발진기를 설계하였다. 제안한 공진기는 기존의 분포소자를 이용한 헤어핀 공진기 면적의 1/4 수준으로 크기를 소형화를 하였다. 발진기의 측정결과 발진주파수는 8.295 GHz, 출력전력은 4.8 dBm, 위상잡음은 100 kHz 오프셋 주파수에서 -106.8 dBc/Hz와 1 MHz 오프셋 주파수에서 -121.7 dBc/Hz를 보였다.

Abstract

In this paper an X-band low phase noise HBT oscillator using a planar type MMIC resonator is designed. The chip area of the proposed resonator shows a quarter of the conventional hair-pin resonator using distributed transmission lines. The measurement results show oscillation frequency of 8.295 GHz, the power output of 4.8 dBm, and phase noise characteristic of -106.8 dBc/Hz and -121.7 dBc/Hz at 100 kHz and 1 MHz offset frequencies respectively.

Key Words: MMIC, oscillator, hairpin, resonator, phase noise

I. 서 론

발진기에서 수동 소자의 구현은 발진기의 위상잡음과 직접적인 관련성 때문에 저잡음 트랜지스터와 더불어 매우 중요한 연구 주제이다. 위상잡음과 발진 회로의 품질 계수 Q값과의 관계로 가장 잘 알려진

식은 아래의 Leeson-Cutler의 위상잡음 모델이다[1].

$$L(\Delta\omega) = 10 \log \left[\frac{2FkT}{P_{sig}} \left\{ 1 + \left(\frac{\omega_o}{2Q\Delta\omega} \right)^2 \left(1 + \frac{\Delta\omega_{1/f^3}}{|\Delta\omega|} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

여기서, F는 잡음지수(empirical parameter), k는 볼츠만 상수, T는 절대온도, P_{sig}는 출력전력, ω_o는 발진

* 주저자 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
** 공저자 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사과정
† 논문접수일 : 2007년 2월 5일

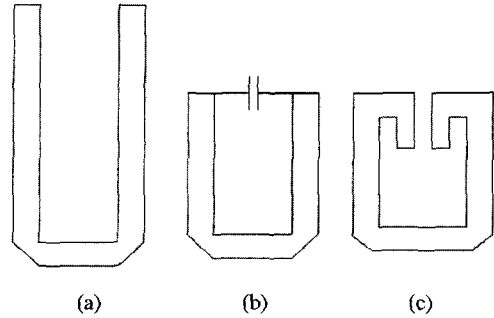
각주파수, Q 는 발진기의 공진부분 부하 품질 계수이다.

Leeson-Cutler 모델은 저주파 flicker 잡음과 열잡음 수준이 동일한 발진조건에서 발진기의 위상잡음은 발진기의 품질 계수 Q 값의 제곱에 반비례하게 된다. 높은 Q 특성의 수동소자의 구현은 특히 MMIC 회로에서는 칩면적(가격)에 민감하므로 크기가 작으면서도 품질 계수가 높은 수동소자의 연구가 매우 중요하다. MMIC 설계에서 수동 소자는 $L/S/C$ 대역과 같은 저주파 대역에서는 분포소자로 구현하는 경우 회로의 크기가 증가함으로 인해 집중소자 개념을 사용하여 구현을 하게 된다. 집중소자를 이용하여 구현하게 되면 회로의 크기는 줄어드는 장점은 있으나 이로 인해 Q 값이 낮아지게 된다. 반면 K/Ka 대역과 같이 높은 주파수에서는 동작 주파수에서 파장이 짧아지게 되어 크기가 상대적으로 덜 민감하게 되고, 집중소자 보다는 분포소자를 직접 이용하여 구현하는 것이 회로의 Q 값 면에서 유리하여 분포소자 개념을 이용하여 구현을 하게 된다.

하지만, X 대역의 경우에는 GaAs기판에서 $1/4$ 파장은 약 $3000 \mu\text{m}$ 로 분포소자를 이용하기에 적당하지 않고, 집중소자를 직접 이용하는 경우에는 부품의 민감도가 증가하고 소자의 Q 값이 중요한 회로의 경우에는 회로 성능 저하를 가져오게 된다. 따라서, X-대역과 분포소자를 직접 사용하기에는 분포소자의 크기가 크고, 집중소자를 이용하기에는 성능이 저하되어 주파수대역에서는 현실적으로 집중소자와 분포소자의 개념을 혼합하여 소자를 구현해야 한다.

MMIC 발진기에 적합한 공진기로 <그림 1>과 같이 평면 구조를 갖고 소형화 개념이 적용된 결합 구조를 갖는 헤어핀 구조가 K대역 등과 같이 높은 주파수에서 적용이 되었다. 헤어핀 공진기는 기본적으로 $\lambda/2$ 전송선로 공진기이나 소형화 방법으로 <그림 1> (b)와 (c)처럼 집중소자의 캐패시터나, 결합 선로를 이용하는 형태가 연구되어 왔다[2]~[4].

하지만, <그림 1>과 같은 구조는 여전히 크기 문제로 인해 X대역 MMIC 발진기의 공진기로는 사용이 어렵다. 헤어핀 공진기의 크기를 줄이는 연구로는 스파이럴 모양으로 크기를 줄여 발진기에 적용한



<그림 1> 기존 헤어핀 공진기의 구조. (a) 반파장 길이의 구조, (b) 캐패시터로 결합하여 소형화한 구조, (c) 결합선로를 이용하여 소형화한 구조

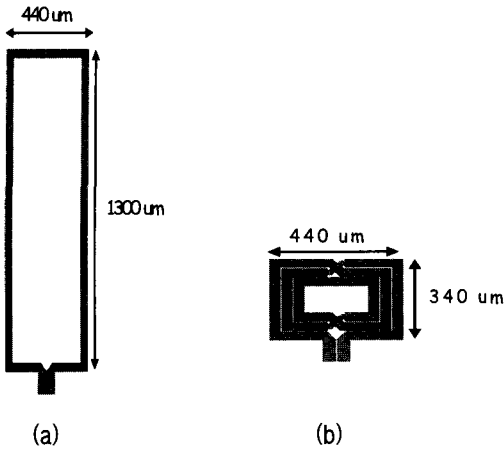
<Fig. 1> The structures of the conventional hairpin resonator. (a) The half wavelength hairpin, (b) the miniaturized hair-pin with the lumped capacitor, (c) the miniaturized structure hair-pin with the coupled line.

구조가 있다[5]. 스파이럴 구조는 단면에 구현할 수 있는 장점이 있지만 한쪽 단자가 내부에 있어 입력 단자와 종단간의 전계결합(커패시터)을 통한 크기의 소형화에 한계가 있다. 본 논문에서는 헤어핀 구조에서 $\lambda/4$ 정도 길이의 전송선로부분을 겹친 모양의 전송선로로 변환하여 소형화를 구현하였다. 제안한 구조를 스파이럴 구조와 비교하면 두개의 금속을 사용하는 단점이 있는 반면 입력과 종단사이의 결합을 커패시터나 결합 라인을 이용하여 크기를 더욱 소형화할 수 있는 장점이 있다. 또한 구조가 대칭적이므로 push-push와 같은 구조에 적합하기도 유리하다. 새로 제안한 구조는 기존 구조에 비해 크기를 $1/4$ 로 정도로 소형화를 하였고, 이를 X 대역에서 동작하는 HBT MMIC 발진기의 공진부에 적용하여 낮은 위상잡음 특성을 구현하였다.

II. X 대역 발진기 설계

1. 공진기 설계

본 논문에서는 X대역 MMIC 발진기의 공진기로

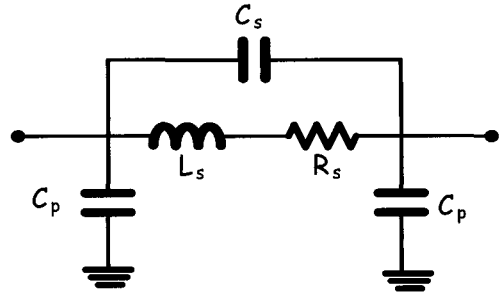


<그림 2> 기존 헤어핀 공진기와 본 논문에서 사용한 공진기의 크기 비교. (a) 기존의 결합 선로를 이용한 헤어핀 공진기 구조, (b) 논문에서 제안한 소형 평면형공진기의 구조

<Fig. 2> The size comparison between a conventional hair-pin resonator and the proposed resonator.
(a) a conventional hair-pin resonator,
(b) the proposed resonator.

헤어핀 구조를 집중소자개념으로 변형한 구조를 채택하였다. 헤어핀 공진기는 평면형 구조이고 접지구조를 가지고 있지 않고 방사 특성이 낮아 품질 계수가 다른 공진기에 비해 높으므로 MMIC 설계에 매우 적합한 공진기이다. 하지만 앞서 기술한 대로 헤어핀 공진기는 기본적으로 $\lambda/2$ 공진기이고, 이를 결합 구조를 이용한다고 하더라도 $\lambda/4$ 정도 (X 대역에서 3000 μm)의 전송선로를 사용하게 되어 주파수가 낮을 때 구현상에 문제가 된다. 따라서 기존 헤어핀 공진기의 크기를 줄이는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 MMIC 공정의 air-bridge metal과 interconnection metal을 이용하여 결합 선로를 제외한 $\lambda/4$ 길이를 내부에 집친 모양의 전송선로로 구현함으로써 기존의 헤어핀 공진기 크기에 비해 그 크기를 현저히 줄일 수 있었다.

<그림 2>는 기존의 헤어핀 구조와 논문에서 적용한 공진기의 치수를 보여 주고 있다. 공진기의 패턴은 4 μm 의 Top Metal을 사용하였고, $W = 35 \mu\text{m}$



<그림 3> 제안한 그림 2 (b)의 2단자 등가모델
<Fig. 3> The 2-port equivalent circuit of the proposed hair-pin resonator shown in Fig. 2 (b).

이고 간극 $S=5 \mu\text{m}$ 이다. 기판은 두께는 95 μm , 상대 유전율은 12.85, $\tan \delta = 0.006$ 이다. 공진기에서 전송선로를 밀집시키기 위해 사용한 crossover 부분의 대칭성을 무시하고 5 GHz~10 GHz의 관심 주파수 영역으로 한정한다면 공진기의 전송선로 부분은 집중소자의 인덕터로 근사적으로 모델링을 할 수 있고, 입출력 단자 부분의 결합 선로는 포트간 커패시턴스와 접지면으로 연결되는 커패시턴스로 모델링을 할 수 있다. 따라서 공진기를 2단자로 측정하는 경우 관심영역에서 등가회로는 <그림 3>같이 나타낼 수 있다. <그림 3>에서 L_s 는 분포소자로 구성된 스파이럴 인덕터의 관심 주파수 영역에서의 인덕턴스를 표현하고, R_s 는 도체와 기판의 유전체 손실로 인해 발생하는 인덕턴스의 손실을 나타낸다. C_s 는 인덕터를 구성는 전송선로간의 결합에 의한 성분과 인덕터의 입출력단에서 결합에 의한 커패시턴스의 합을 나타낸다. C_p 는 입출력 단자와 접지면 사이의 기생 커패시턴스와 인덕터와 접지간의 기생 커패시턴스의 합을 나타낸다.

<그림 2> (b)는 모멘텀법을 사용하는 2.5D 상용 코드인 ADS Momentum을 이용하여 2단자 파라미터 값으로부터 계산한 제안한 공진기의 등가 모델이다. 제안한 공진기의 동작원리와 공진점 근처에서의 등가회로 값을 파악하기 <그림 3>의 π -등가회로를 생각해 보자. π -등가회로의 등가모델의 파라미터 값은 Y-파라미터를 이용하면 효율적으로 그 값을 찾을

수 있다. Y-파라미터를 이용하여 등가 모델의 각 파라미터의 초기 값을 찾는 방법은 아래와 같다.

$$L_s \approx \frac{1}{\omega \cdot \text{imag}\{Y_{21}\}} \quad (\omega < \omega_p) \quad (2)$$

$$C_s \approx -\frac{\text{imag}\{Y_{21}\}}{\omega} \quad (\omega > \omega_p) \quad (3)$$

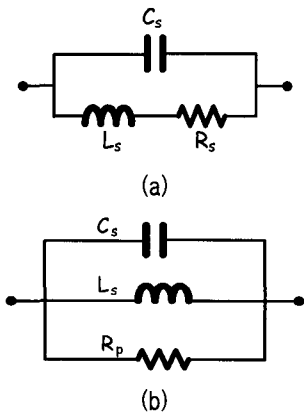
$$C_p \approx \frac{1}{\omega} [\text{imag}\{Y_{21}\} + \text{imag}\{Y_{11}\}] \quad (4)$$

C_p 는 아래의 근사 직렬 공진 주파수로부터 구할 수 있다.

$$\omega_s \approx \frac{1}{\sqrt{L_s C_p}} \quad (5)$$

인덕터 손실에 대한 저항 (R_s)는 공진기의 Q와의 관계식으로부터 구할 수 있다. 공진기의 Q값의 정의는 아래와 같이 위상 변화율의 관계식으로 정의할 수 있다[6].

$$Q = \frac{\omega_o}{2} \left| \frac{d\phi}{d\omega} \right| \quad (6)$$



<그림 4> R_s 를 구하기 위한 등가모델. (a) 그림 3의 Y_{21} 의 등가 모델, (b) 병렬공진주파수 근처에서 Y_{21} 근사 등가회로

<Fig. 4> The equivalent circuit model to determine R_s . (a) The equivalent circuit of Y_{21} of Fig. 3, (b) The approximated equivalent circuit of Y_{21} around the parallel-resonant frequency.

<표 1> 그림 3의 등가모델의 파라미터 값

<Table 1> Parameter values of the equivalent circuit of Fig. 3.

파라미터	단위	파라미터 값
Ls	nH	2.49
Cs	fF	40.1
Cp	fF	144
Rs	Ω	4.3

이때 위상값은 1단자 임피던스나 어드미턴스에 대한 위상이다. 설계한 공진기는 발진기에서 1단자로 사용되므로 한쪽 단자를 개방 상태로 놓아둔 상태로 이용된다. 이 경우 직렬공진주파수(ω_s)와 병렬공진주파수(ω_p)가 존재하게 된다. 발진기에서 공진기는 인덕턴스를 갖는 부분에서 이용한다면 직렬공진점과 병렬공진점사이에서 동작하게 된다.

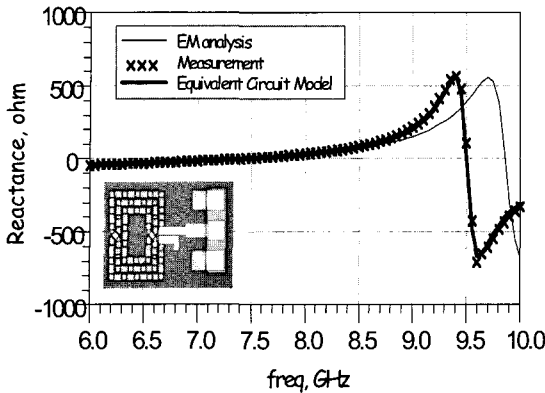
<그림 3>에서 R_s 의 값은 병렬 공진점의 Q값을 이용하여 구할 수 있다. 병렬 공진주파수 근처에서 Y_{21} 값은 <그림 3>의 π -구조에서 직렬 연결회로인 <그림 4> (a)에만 관련이 있다. <그림 4> (a)는 병렬 공진회로로 병렬 공진 주파수 근처에서 동일한 Q값을 갖는 <그림 4> (b)의 구조로 변환이 가능하다. <그림 4> (a)에서의 Q값과 R_s 값과의 관계는 아래와 같다.

$$R_s = \frac{\omega_o L_s}{Q} = \frac{(\omega_o L)^2}{R_p} \quad (7)$$

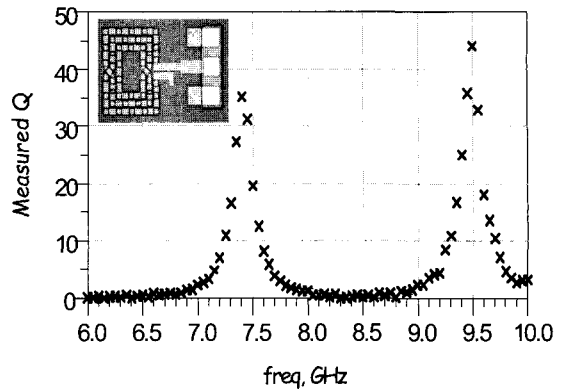
R_s 는 <그림 4>에서 병렬공진 주파수에서 Q를 구한 후 식 (7)로부터 계산할 수 있다. 앞의 수식을 이용하면 본 논문에서 사용한 공진기의 등가회로 값은 <표 1>과 같다.

제안한 공진기에 대한 등가 모델의 추출된 값과 측정 결과와 부합하는지 알아보기 위해 <그림 5, 6, 7>에 리액턴스, 위상, 품질 계수를 측정결과와 비교하였다. 측정은 GSG 프로브를 이용한 온웨이퍼 (on-wafer) 측정을 하였다.

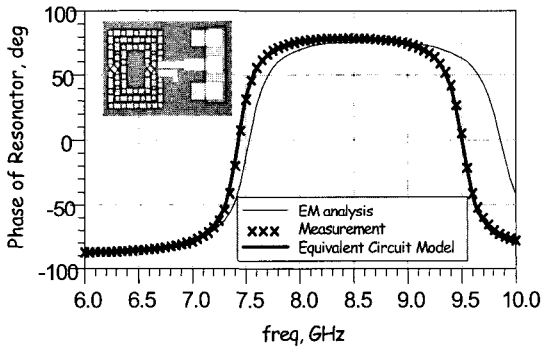
<그림 5>와 <그림 6>은 공진기의 한쪽을 개방하여 사용할 때의 임피던스와 위상 곡선을 표시하고



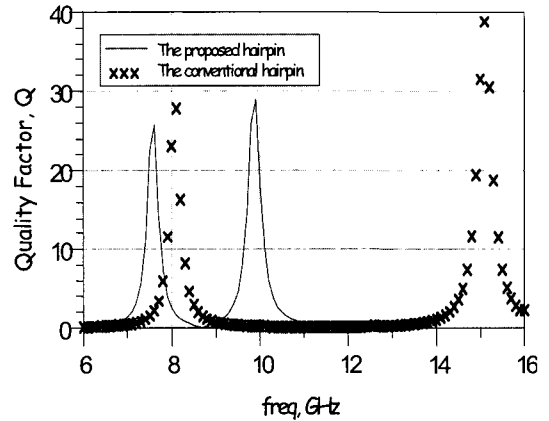
<그림 5> 제안한 공진기를 1단자로 사용 시 리액턴스 곡선.
 <Fig. 5> The reactance curve of the proposed hairpin resonator as an one-port resonator.



<그림 7> 직렬 및 병렬 공진에서의 측정된 품질계수 Q.
 <Fig. 7> The measured quality factor Q of the proposed hairpin at the series and parallel resonant frequencies.



<그림 6> 제안한 공진기를 1단자로 사용 시 위상 곡선.
 <Fig. 6> The phase curve of the proposed hairpin resonator as an one-port resonator.



<그림 8> EM 해석을 이용하여 제안한 공진기 구조와 기존 헤어핀 구조의 품질 계수 비교
 <Fig. 8> The comparison of quality factor between the proposed resonator and the conventional hairpin resonator using EM simulation.

있다. 측정결과 공진기는 7.4 GHz와 9.5 GHz에서 각각 직렬 공진 주파수와 병렬 공진 주파수를 갖는다. EM 해석 결과와 측정 사이에 0.5 GHz 정도의 병렬 공진주파수의 차이가 발생하였다. 이는 EM 해석시 고려하지 않았던 ABP (Air-Bridge Post)의 영향과 이로 인해 구현시 Top Metal이 ABP의 높이로 인하여 밑으로 늘어지게 되어 공진 주파수가 내려가게 되었다. 정확한 ABP의 유전율에 대한 정보와 ABP간극을 설계한 구조보다 좁게 하게 되면 설계와 측정사이의 오차를 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

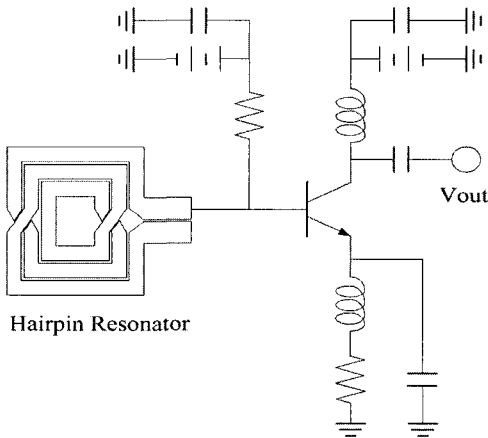
<그림 6>은 1단자 공진기의 위상 값을 보여 주고 있다. 위상변화는 직렬공진 주파수와 병렬공진 주파수에서 급격히 변함을 볼 수 있다.

<그림 7>은 식 (6)을 사용하여 위상 변화를 미분하여 얻은 공진기의 Q값이다. 측정 결과 공진기의 Q값은 직렬공진에서 35 병렬공진에서 44의 값을 얻었다.

기존의 헤어핀 공진기와 본 논문의 공진기의 Q값을 비교하기 위해 <그림 2> (a) 구조에 대한 EM 해석을 한 후 이를 제안한 구조의 EM 해석 결과와 비교하였다. <그림 2> (a)에서 전송선로의 길이를 <그림 2> (b)에서의 겹쳐진 전송선로의 길이와 같도록 설정을 하였다. 해석 결과 기존 구조에서 헤어핀 모양은 전송선로간의 간섭으로 인한 기생 커패시턴스가 존재하지 않으므로 병렬공진 주파수가 이 제안한 구조보다 높게 된다. 품질 계수 Q 값은 직렬 공진은 <그림 8>에서 알 수 있듯이 <그림 2> (a) 구조가 시뮬레이션 결과 28.5, 제안한 구조는 26으로 약 10%의 저하가 있었고, 병렬공진은 39에서 29로 약 25%의 저하가 발생하였다. 일반적으로 회로의 크기는 공진기의 Q 값과 비례하게 됨을 보여주고 있다. 본 논문에서는 면적은 약 75%로 매우 크게 줄이고 Q 값은 10~25%정도 저하가 되어 제안한 구조가 MMIC에 매우 적합함을 알 수 있다.

2. 발진기 설계

MMIC 회로의 제작은 나리지온사의 InGaP/GaAs HBT MMIC 공정으로 제작하였다. 제작시 사용한

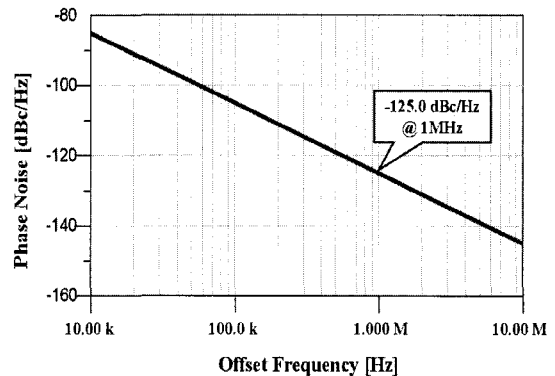


<그림 9> 제안한 소형 평면 공진기를 이용한 X 대역 발진기 회로도

<Fig. 9> An X-band MMIC oscillator circuit using the proposed resonator.

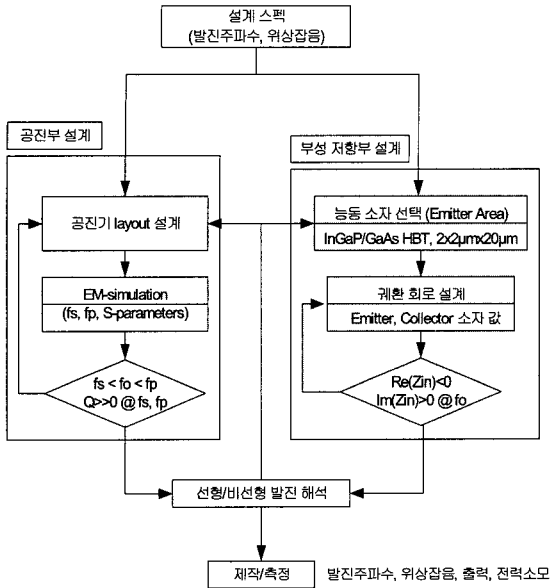
InGaP/GaAs HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)소자는 2개의 에미터 핑거, 2 μm 의 에미터 폭, 20 μm 의 에미터 길이로 구성되어 있다. 또, 컬렉터 전류가 10 mA 일때 단위 전류 이득 주파수(f_t)는 약 35 GHz 이고, 최대 단위전류 이득 주파수(f_{Max})는 약 55 GHz의 특성을 갖는다. 특히, 에미터 외곽을 둘러싼 형태의 확장된 InGaP 턱(ledge)으로 인해 외부의 베이스 영역에 대한 보호가 되어 베이스 영역에서 주로 발생되는 flicker 잡음($1/f$ 잡음)이 작아 낮은 위상 잡음을 갖는 발진기를 설계에 적합하다. 또한 빠른 동작속도, 높은 동작주파수, 높은 선형성, 높은 이득과 높은 효율 등의 장점이 있으므로 고주파 발진기에 적합한 구조를 갖고 있다.

사용한 HBT소자의 모델로 Self-heating 효과와 Quasi-saturation modeling을 포함한 VBIC(Vertical Bipolar Inter-Company)을 이용하였다. <그림 9>는 설계한 X 대역 발진기의 회로도이다. 공진부가 인덕턴스로 동작하고 HBT의 베이스와 콜렉터 사이의 내부 커패시턴스를 고려하면 구조는 폴릿츠 구조임을 알 수 있다. 바이어스 구조는 저주파에서 부성 피드백으로 인해, 위상잡음 면에서 유리한 셀프바이어스(self-bias)구조를 적용하였다. 베이스 부분의 저항은 전압 인가시 순간적인 과전류가 HBT의 베이스 단으로 흘러 트랜지스터가 파손되는 것을 방지하기 위해 사용하였으며, 컬렉터 부분의 인덕터는 RF 초



<그림 10> 설계한 발진기의 위상 잡음특성(시뮬레이션)

<Fig. 10> The phase noise characteristic of the designed oscillator(simulation).



<그림 11> 발진기의 설계 흐름도
 <Fig. 11> Design procedure for the proposed HBT oscillator.

크로 사용하였다.

제안한 공진기는 발진시 인덕터로 동작하며, 초기 선형 발진 조건에서 바이어스 전압은 베이스단과 콜렉터단에 각각 3V, 3.5 V를 넣고 콜렉터 전류는 27 mA가 흐르게 설계하였다. 시뮬레이션 결과 발진 주파수는 8.17 GHz에 8.7 dBm의 출력전력을 갖는다. <그림 10>은 위상잡음 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 1 MHz 오프셋 주파수에서 -125.0 dBc/Hz의 특성을 보였다. <그림 11>은 발진기의 설계를 요약한 설계 흐름도를 보여주고 있다.

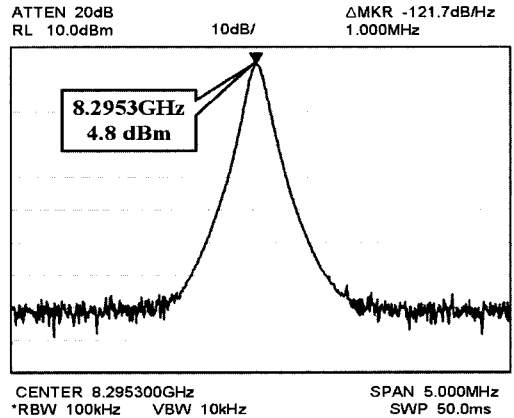
III. 측정 결과

발진기 제작은 InGaP/GaAs HBT MMIC 공정을 이용하여 1.1 mm × 0.9 mm의 크기로 제작하였으며, 측정은 웨이퍼 상태에서 RF용 150 μm pitch GSG-type의 프로브를 이용하여 측정을 실시하였다. 측정 장비는 Agilent사의 HP 6626A 전원 공급기와 HP 8564E 스펙트럼 분석기를 사용하였다. 다양한 바이어스 값에 따라서 소모전류, 주파수, 출력전력,

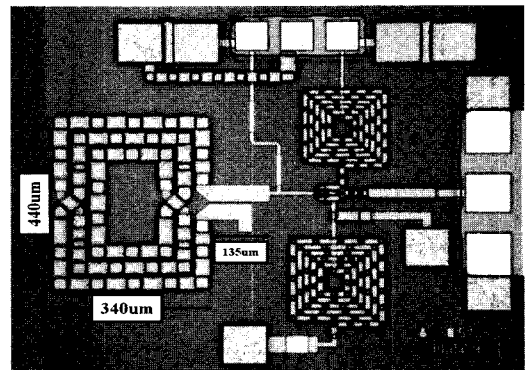
<표 2> 여러 바이어스조건에서의 발진기의 성능 측정 결과

<Table 2> The measured data under the various bias conditions.

바이어스 조건 (VCE, IC)	1.9V, 12mA	2.1 V, 18 mA	2.35 V, 23 mA	2.75 V, 15 mA	3.8 V, 24 mA
f ₀ freq. [GHz]	8.32	8.30	8.30	8.38	8.38
P _{out} [dBm]	3.2	3.0	4.8	6.5	9.5
P/N dBc/Hz@1MHz	-117.0	-118.7	-121.7	-117.7	-119.3



<그림 12> 위상 잡음 특성 (1 MHz 오프셋 주파수)
 <Fig. 12> The phase noise characteristic at 1 MHz offset frequency.



<그림 13> 제작한 X 대역 발진기의 사진 (1.1 mm × 0.9 mm)
 <Fig. 13> The photograph of the designed X-band oscillator (1.1 mm × 0.9 mm)

<표 3> MMIC 발진기의 특성 요약

<Table 3> The summarized characteristics of MMIC oscillators

Reference	Device Technology	f0 [GHz]	phase noise dBc/Hz	power [dBm]	size [mm ²]	resonator
[7]	0.18 CMOS	8	-117 @ 1MHz	-8	0.9×0.75	Differential LC
[8]	AlGaIn/GaN HEMT	9.556	-115 @ 1MHz	2.3	1.6	CPW
[9]	MESFET	11.5	-91 @ 100kHz	11.5	0.66×0.92	LC
[4]	MESFET	20.8	-95 @ 1MHz	11.5	1.5×2.0	MMIC Hairpin
This work	InGaP/GaAs HBT	8.295	-121.7 @ 1MHz	4.8	1.1×0.9	MMIC Hairpin

위상잡음 등을 측정하였고 그 결과는 <표 2>와 같다.

측정결과 주파수는 8.29~8.38 GHz, 출력 전력은 3 dBm 이상, 위상잡음은 1 MHz 오프셋 주파수에서 -121.7 dBc/Hz 보였다. <그림 12>는 VCE = 2.35V, IC = 23 mA일 때 1 MHz 오프셋 주파수에서의 위상잡음특성을 보여주고 있다. <그림 13>은 InGaP/GaAs HBT공정을 이용하여 실제 제작한 X대역 발진기의 현미경 촬영 사진을 보여주고 있다.

<표 3>은 X 대역 MMIC 발진기에 대한 주요 논문의 특성을 요약한 결과이다. 본 논문에서 설계한 발진기의 위상잡음 특성이 다른 연구 결과에 비해 상대적으로 우수함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 소형 공진기를 이용한 X 대역에서의 발진기를 설계 제작하였다. 제작한 공진기는 기존 헤어핀 공진기에 비해 크기를 1/4로 줄여서 구현하였다. 측정 결과 특정 바이어스 전압상태 하에서 발진 주파수는 8.295 GHz, 100 kHz와 1 MHz 오프셋 주파수에서 각각 -106.8 dBc/Hz와 -121.7 dBc/Hz의 위상 잡음 특성을 나타내었으며, 4.8 dBm의 출력 특성을 보였다. 특히 저잡음 특성을 갖는 소자인

HBT와 발진기 설계 과정에서 시뮬레이션을 통한 최적화를 통해 우수한 위상 잡음 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안한 헤어핀 공진기의 예상되는 단점은 기존의 구조에 비해 Q 값이 낮아질 수 있다는 것이다. 기존 구조에 비해 Q값의 저하는 직렬 공진점에서 약 10%, 병렬공진 점에서는 약 25%정도 발생하였다. 이는 면적이 1/4정도로 줄어든 장점에 비교해 본다면 MMIC에 매우 적합한 구조라 할 수 있다.

참고문헌

- [1] D. B. Leeson, "A simple model of feedback oscillator noise spectrum," in *Proc. IEEE*, vol. 54, Feb. 1966, pp. 329-330.
- [2] M. Sagawa, K. Takahashi, and M. Makimoto, "Miniaturized hairpin resonator filters and their application to receiver front-end MIC's," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, no. 12, pp. 1991-1997, Dec. 1989.
- [3] Ni Wan, Yuan Xiaojuen, Y. V. Tretiakov, R. Groves, and R. L. E. Larson, "Design and modeling of a high-Q on-chip hairpin inductor for RFIC applications," *Proc. 2003 Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symp.*, pp. 547 - 550, June 2003.
- [4] C. G. Hwang, et al., "Simple K-band MMIC VCO utilizing a miniaturized hairpin resonator and a three-terminal p-HEMT varactor with low phase noise and high output power properties," *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 229-231, June 2003.
- [5] Y.-T. Lee, J.-S. Lim, C.-S. Kim, D. Ahn, and S. Nam, "A compact-size microstrip spiral resonator and its application to microwave oscillator," *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 375-377,

- Oct. 2002.
- [6] B. Razavi, *RF Microelectronics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [7] D. H. Baek, et al., "8-GHz CMOS quadrature VCO using transformer-based LC tank," *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 13, no. 10, pp. 446-448, Oct. 2003.
- [8] V. S. Kaper, et al., "High-power monolithic AlGaIn/GaN HEMT oscillator," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 9, pp. 1457-1461, Sept. 2003.
- [9] C. -H. Lee, et al., "A low phase noise X-band MMIC GaAs MESFET VCO," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 325-327, Aug. 2000.

저자소개



이 문 규(Lee, Mun-Gyu)

1992년 2월: 한국과학기술원 전기및 전자공학과 (공학사)

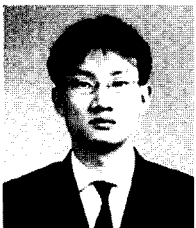
1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)

1999년 2월~2002년 2월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2002년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학 부교수

[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동(RFIC, MMIC, Hy-brid) 및 수동 부품 및 시스템 설계



조 일 현 (Jo, Il-Hyeon)

2005년 2월 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 학사

2007년 2월 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사



최 종 원 (Choe, Jong-Won)

2003년 2월 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 학사

2005년 2월 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 석사