

# 능동소자의 접합 커패시턴스를 이용한 VCO 설계에 관한 연구

## A Study on the Design of VCO Using Junction Capacitance of Active Element

강석엽\*, 박욱기\*\*, 고민호\*\*, 박효달\*\*

Suk-Youb Kang\*, Wook-Ki Park\*\*, Min-Ho Go\*\*, Hyo-Dal Park\*\*

### 요 약

본 논문에서는 경량화, 소형화 가격절감에 맞추어 전압 제어 발진기의 공진기 부분에 바랙터 다이오드를 사용하지 않고, 발진부에 사용된 트랜지스터의 베이스 단에 제어 전압을 인가하여 TR 내부 커패시턴스를 변화시키므로 하여 X/Ku 대역 민수용 RD에 사용 가능한 전압 제어 발진기를 설계 및 제작하였다. 시뮬레이션을 수행 한 결과 설계한 전압 제어 발진기는 4.25 V에서 4.80 V까지의 제어 전압에 의하여 약 110 MHz의 주파수 동조 범위를 보였으며, 11.46 GHz 동작 주파수에서 9.63 dBm의 출력 및 1 MHz의 오프셋 주파수에서 -107.2 dBc의 위상잡음 특성을 나타내어 상용 목적에 적합한 성능을 내었다.

### Abstract

In this paper, keeping pace with light weight, pocket-size, lower-price, we design VCO(Voltage Controlled Oscillator) X/Ku band for using at public RD(Radar Detector) to apply to controlled voltage on base in transistor which used as a oscillator, without using varactor diode in part of VCO tuner. As a result of simulation, we conclude VCO could be have 110 MHz by controlled voltage 4.25 V to 4.80 V and show its output 9.63 dBm at operating frequency, 11.46 GHz , and its phase noise -107.2 dBc at 1 MHz offset frequency. So it turned out suitable performance for commercial use.

### I. 서 론

최근 광대역 멀티미디어 서비스에 관련된 요구가 높아짐에 따라 밀리미터파 및 마이크로파의 높은 주파수를 이용하는 통신 시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며 또한 디지털 위성방송의 상용화로 인해 초고주파 대역에 대한 연구와 핵심부품에 대한 연구

및 개발이 진행되고 있으며 또한 외국에서는 의무화 및 대중화가 되어 있는 차량 정보와 과속 방지를 위한 레이더 검출기(Radar detector)와 같은 제품들은 성능 외에 가격적인 측면에서도 경쟁력을 갖춘 제품 개발을 위한 노력이 계속되고 있다.

이처럼 밀리미터파 및 마이크로파 대역의 제품 수요가 증가하고 있기 때문에 예전에는 위상 잡음, 출력 전력, 안정도 및 발진 주파수 등이 발진기의 중

\* 인하대학교 전자공학과(Dept. Electronics Eng., In-Ha University)

· 논문번호 : 2004-1-7

· 접수일자 : 2003년 11월 13일

요한 특성으로 평가되었으나 최근에는 제품의 가격 절감, 소형화 및 생산성 향상에 관한 관심이 대두되고 있다.

일반적으로 송/수신단에 사용되어지는 전압제어 발진기 (Voltage Controlled Oscillator : VCO)는 모든 시스템에서 중요한 부품으로 PLL(Phase Locked Loop)과 함께 사용되고 있으며 전체 시스템의 안정성과 IF신호의 왜곡특성에 상당한 영향을 미침으로 송/수신단에서 매우 중요한 마이크로웨이브 부품 중에 하나이다.

특히, 발진기의 위상 잡음의 특성 저하는 아날로그 수신기의 SNR(Signal to Noise Rate)을 감소시키고, 디지털 통신용 송수신기의 BER(Bit Error Rate)를 높이며, 통신 채널간의 간격을 제한시키고, Homodyne방식의 레이더 시스템에서는 해상도를 저해하는 등 통신 시스템의 성능에 많은 영향을 주기 때문에 세심한 설계를 요구한다. 일반적으로 공진부는 높은 Q값 특성을 갖기 때문에 위상잡음 특성 및 안정성이 우수하고 온도 변화에 따른 영향이 적은 유전체 공진기를 한다. 또한 높은 대역에서 사용되는 고가의 바랙터 다이오드는 패키징화 되어 있지 않은 칩상태로 제공되기 때문에 본딩 와이어와 같은 작업을 통하여 PCB 보드에 장착해야하기 때문에 생산성의 문제를 가지고 있다.

본 논문에서는 소형화 및 가격절감 그리고 생산성 향상을 요구하는 추세에 맞추어 공진부에 바랙터 다이오드를 사용하지 않고 발진부에 사용한 단일 트랜지스터를 PN 접합 다이오드로 이용하여 전압제어 발진기를 설계 및 제작하였다.

## II. 발진기 이론

### 2-1 발진기 구성

발진기의 초기 발진은 능동소자에 공급되는 DC 전력의 노이즈 레벨에서 발진이 시작되어 발진출력이 점점 성장하여 정상상태에 이르러 안정된 정현파를 만들어 낸다. 이러한 기능은 부성저항의 개념을 이용하는데, 주로 부성 저항의 소자로는 다이오드와 같은 2단자 소자가 이용되지만 트랜지스터와 같은 3

단자 소자도 궤환 회로망을 첨가해서 부성저항의 특징을 갖도록 하여 발진기에 응용할 수 있다. 그림 1은 2단자 회로망에 근거한 발진기 구성도를 나타내었다.

2단자 발진기 회로망은 능동소자와 궤환 회로로 구성된 발진부와 안정된 발진 주파수를 발생시키기 위한 공진부 및 믹서회로 입력단과 임피던스 정합을 위한 출력 정합회로로 구성된다.[1][2]

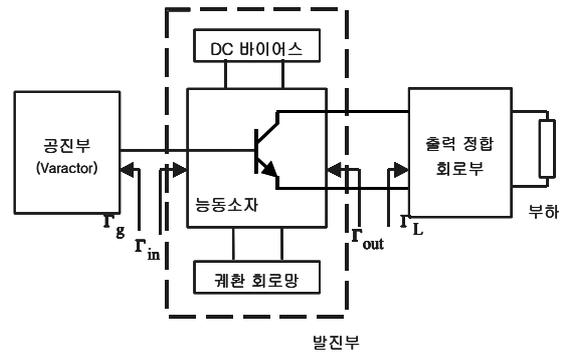


그림 1. 일반적인 전압제어 발진기 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram for a VCO

발진부의 입력과 출력 측에서 바라본 반사계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma_{IN} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \tag{1}$$

$$\Gamma_{OUT} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \tag{2}$$

스미스 차트(Smith chart)에  $|\Gamma_{in}|$ ,  $|\Gamma_{out}|$ 이 1인 원을 표시함으로써 부성 저항을 나타내는지의 여부 즉, 발진이 일어날 수 있는지의 여부를 판단할 수 있으며 일반적인 발진조건은 다음과 같다.

$$K < 1 \quad (K = \text{stability factor}) \tag{3}$$

$$\Gamma_{IN}\Gamma_g = 1 \tag{4}$$

$$\Gamma_{OUT}\Gamma_r = 1 \tag{5}$$

발진을 위해서는  $K < 1$ 인 불안정(unstable) 영역

에 있어야 하는데 만약 안정도지수(K)가 1보다 크다면 회로의 구조를 바꾸거나 정궤환 특성을 갖는 궤환 회로를 추가해야 한다.

입출력 단에는 원하는 주파수 및 부하 조건에서 발진이 일어나도록 구성된 공진부 및 정합회로를 부가시킨다. 발진조건 식 (4)와 (5)는 어느 한 단자에서 발진을 한다면 또 다른 한쪽 단자에서도 발진이 일어나는 것을 말한다. 공진부 반사 계수  $|\Gamma_{in}|$ 의 크기는 1보다 적으므로  $|\Gamma_{in}|$ 이 1보다 커야 하며 원하는 발진 주파수에서 안정된 발진 상태를 유지하기 위해서는 공진부의 Q값이 커야 한다. [3]

### 2-2 주파수 가변부

전압제어발진기(Voltage-Controlled Oscillator : VCO)는 제어 전압에 의해서 출력 주파수를 가변시킬 수 있는 부품으로 이런 기능을 위해서 공진회로에 역방향의 제어 전압에 따른 커패시턴스 값이 가변되는 바랙터(varactor) 다이오드를 사용한다.

일반적인 VCO의 공진부의 회로 구조는 그림 2와 같다.

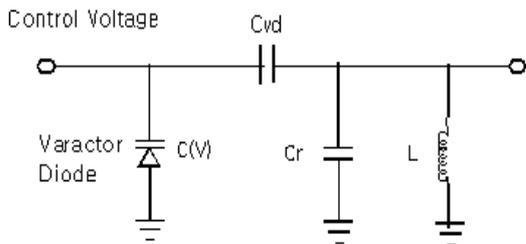


그림 2. 전압제어 발진기의 공진기 구조  
Fig. 2. The resonator structure of VCO

공진기 내에서의 전체 커패시턴스  $C(t)$ 는 식 (6)으로 주어 진다.

$$C(t) = \frac{C(v)C_{vd}}{C(v) + C_{vd}} + C_r \quad (6)$$

여기서  $C_{vd}$ 는 제어전압에 따른 바랙터 다이오드의 가변 커패시턴스 값을 나타낸다.

그림 3은 능동소자인 바이폴라 트랜지스터를 이용하여 바랙터 다이오드와 같은 역할을 유도할 수 있는 구성을 나타낸 것이다.

그림 3의 구성에서는 접합 커패시턴스의 큰 순서로 (a)에서 (f)까지 나열 하였으며, 일반적으로 사용해 오던 방법은 (a)에서 (c)형태로 구성하여 순수하게 바랙터 다이오드 형태로만 사용하여 발진 해 왔다.

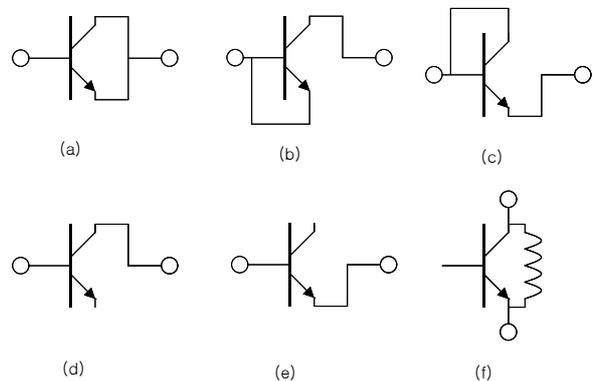


그림 3. 바랙터를 NPN 트랜지스터로 한 구성들  
Fig. 3. The configurations for NPN-transistor based varactor

본 논문에서는 그림 3의 (d)로 구성하였으며, 이 구조는 Q인자가 높고 컬렉터와 베이스에 바이어스 전압을 인가 할 수 있어 발진기와 바랙터 역할을 동시에 할 수 있는 적합한 구조이다.[4] 이러한 구조로 VCO를 설계시 발진부에 사용되는 능동소자의 접합 커패시턴스를 이용하여 바랙터 다이오드 역할을 하기 위해 일반적으로 공진부에 사용해야하는 바랙터 다이오드를 사용하지 않을 수 있으므로 저가 및 소형 그리고 생산성의 향상을 꾀할 수 있다.

이런 경우 능동소자를 바랙터 다이오드로 사용하기 위해서 항상 컬렉터 전압 보다 베이스 전압이 낮아야 바랙터 다이오드로 기능을 할 수 있게 된다.

### 2-3 위상잡음

능동소자(BJT, GaAs FET)에서 발생하는 산탄,

플리커 잡음 및 회로 내에서 생성되는 여러 가지 잡음원은 발진기의 출력 신호를 변조시킨다. 즉, 이상적인 발진기의 출력 스펙트럼은 발진 주파수(Oscillation Frequency,  $f_0$ )에서 직선에 가까운 스펙트럼 특성을 나타내지만 잡음에 의해서 스펙트럼 폭이 넓어지는 현상이 발생한다. 이런 현상을 발생시키는 잡음원을 위상잡음이라 정의한다. 위상잡음에 의해서 발진 신호의 스펙트럼 폭이 넓어져 다른 신호와의 간섭을 발생시키기 때문에 위상 잡음은 발진기를 설계하는데 중요시되는 파라미터이다. 발진기의 위상 잡음은 주어진 오프셋 주파수(off set frequency,  $f_m$ )에서 1Hz 대역폭 내에 존재하는 잡음 전력과 신호 주파수에서 전력의 비로 정의되는 SSB(Single Side Band) 위상잡음으로 정량화 된다.[5]

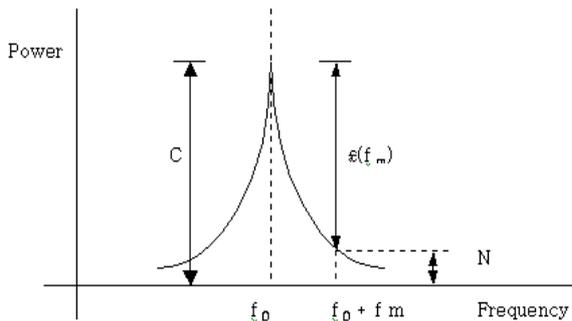


그림 4. 발진기의 위상잡음  
Fig. 4. The phase noise of oscillator.

2-4 트랜지스터의 모델링

일반적으로 package-type Si-BJT의 내부 등가 회로를 보면 그림 5와 같다. 그림 5에서 상자 부분은 intrinsic parameter이고 그 외 부분들은 extrinsic parameter이다. intrinsic parameter는 Eber-Moll Model과 Gummel-Poon Model로 구성될 수 있다. Eber-Moll Model은 순방향 전류 이득과 역방향 전류 이득이 전류에 종속적이고 베이스와 컬렉터 전압에 영향을 받아  $I_s$  전류로 나타낸다. Gummel-Poon Model은 그림 6과 같이 Eber-Moll Model에 전류 종속된 베이스 저항( $R_{BB}$ )과 분산 베

이스와 컬렉터의 접합 커패시턴스( $C_{BC}$ )의 사양이 추가로 되어 있다. 저주파수 일 때는 extrinsic parameter의 영향이 적어 intrinsic parameter만으로는 해석이 가능 하지만 주파수가 증가하면 extrinsic parameter의 영향이 커져 간단한 등가회로 만으로 package-type의 트랜지스터를 해석하기가 용이하지 않다. 따라서 intrinsic parameter 와 extrinsic parameter를 모두 포함한 two port network으로 그림 아래 그림 5와 같이 표현 된다.

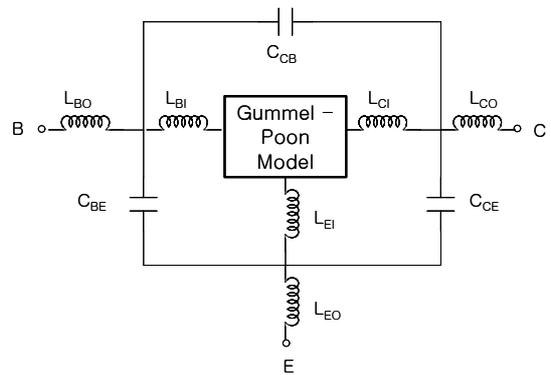


그림 5. 비선형 모델 회로  
Fig. 5. The non-linear model circuit

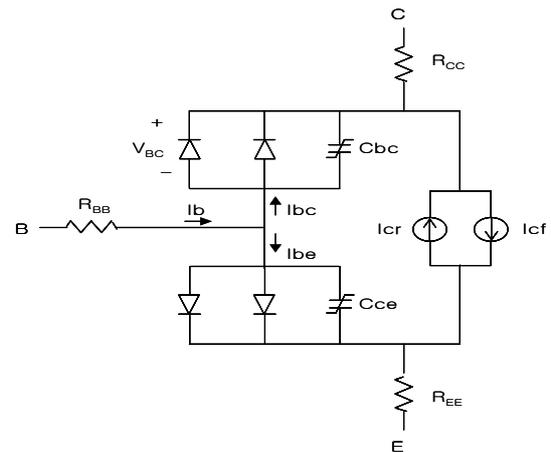


그림 6. Gummel-Poon Model 회로  
Fig. 6. The Gummel-Poon model circuit

본 논문에서는 infineon사에서 제공하는 Si-BJT BFP520 트랜지스터를 위 그림 5와 같이 모델링 하여 전압 제어 발진기를 설계 하였다.

### III. 전압제어 발진기 설계 및 제작

#### 3-1 발진기 회로 설계 및 제작

본 논문에서 사용된 능동소자로는 infineon사에서 제공 해주는 Si-BJT BFP520 트랜지스터(Q2)와 모토롤라사에서 제공한 NPN 2SC3904 트랜지스터(Q1)를 사용하여 X/Ku 대역 민수용 RD(Radar detector)에 사용 가능한 발진기를 설계하였다. 발진부에는 BFP520(Q2)을 비선형 모델링 하여 사용하였고, 이 발진부 베이스단에서 튜닝전압을 인가하기 때문에 컬렉터에서 이미터로 흐르는 전류가 변하므로 이 전류를 일정하게 유지시키기 위해 전류원을 사용하였으며, 이 전류원은 2SC3904 트랜지스터(Q1)를 사용하여 전압 분배 바이어스 회로로 구성하였다. 발진부에 사용된 능동소자(Q2)를 구동시키기 위한 바이어스 회로를 설계하였으며, 바이어스 회로는 마이크로파에 영향을 주지 않게 컬렉터 부분에 바이어스 전압을 인가하였고, 베이스 부분에는 주파수를 동조 하기위해 튜닝 전압을 인가하였다. 그리고 광대역 특성이 좋은 open radial stub를 이용하여 바이어스 회로를 설계하였다. radial stub의 반경을  $\lambda/4$ 보다 작게 하였으며, 또한 RFC(RF 초크)의 임피던스는 시스템의 특성 임피던스보다 훨씬 높은 임피던스를 사용하였다. 이로 인해서 직류는 통과시키고 교류신호는 통과시키지 않게 설계 하였다. 그림 7과 같이 마이크로스트립 선로로 구성된 바이어스 회로의 구조를 나타내었다.

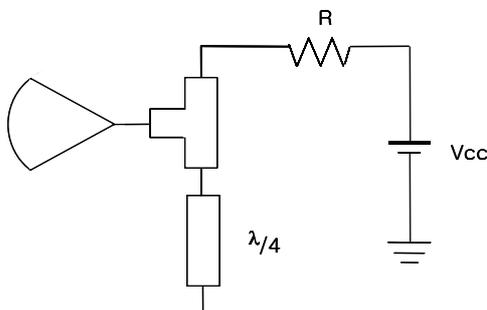


그림 7. DC 바이어스 회로  
Fig. 7. Circuit of DC bias.

그리고 공진부와 부성저항을 갖게 해주는 부분에는 튜닝 작업을 쉽게 하기 위해 Open Stub를 사용하여 설계 하였으며, Agilent Technologies사의 상용 해석 툴인 ADS를 사용해 선형 방법으로 대략적인 소자 값을 결정한 후 HBM(Harmonic Balance Method)으로 전압제어 발진기를 설계하였다.

전체 전압제어 발진기 회로는 그림 8과 같은 구조이다. 그림 8에서 각 회로부의 기능을 점선으로 표시하였다. 회로내의 Q2는 발진기의 기능과 내부에 포함하고 있는 C값에 의하여 공진부의 일부로 작용을 하며, 그 C값은 베이스에 걸리는 튜닝전압에 의하여 변화하고 이로 인하여 공진 주파수의 변화를 야기하게 된다. 즉 Q2는 발진기의 기능과 바랙터 다이오드의 기능을 동시에 지니게 된다.

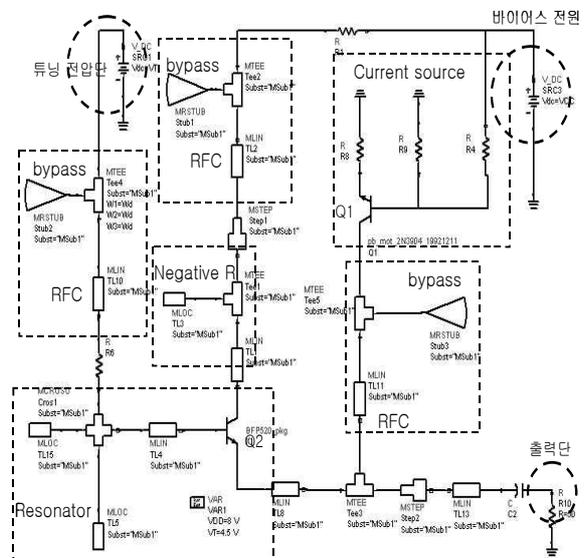


그림 8. 전압제어 발진기 구조  
Fig. 8. Structure of VCO

그림 9는 위에서 설계된 값으로부터 구한 전압제어 발진기의 layout이며 사이즈는 가로 24 mm 세로 14 mm 이다. 유전율은 2.5이며, 두께는 0.5 mm 인 Teflon 기판을 사용하였다.

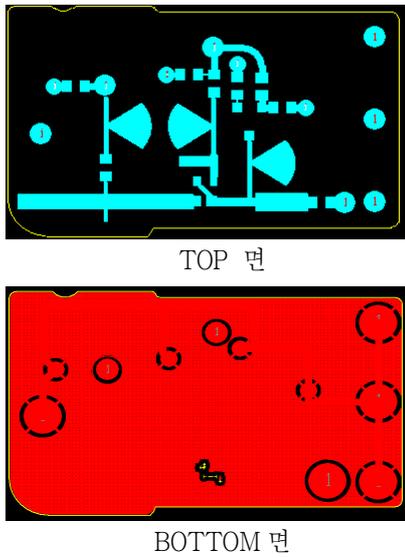


그림 9. 전압제어 발진기의 레이아웃  
Fig. 9. Layout of VCO

3-2 설계 결과

그림 10은 모의 실험한 결과로 얻은 발진 출력을 나타내는 것으로 11.46 GHz에서 출력전력 9.63 dBm 과 약 -7.09 dBm의 제2 고조파 특성을 보여준다.

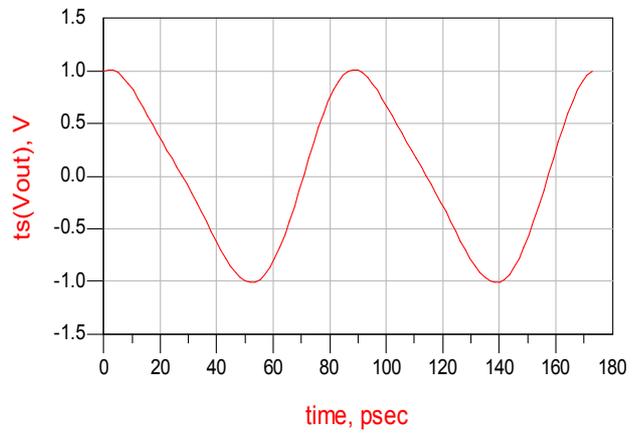
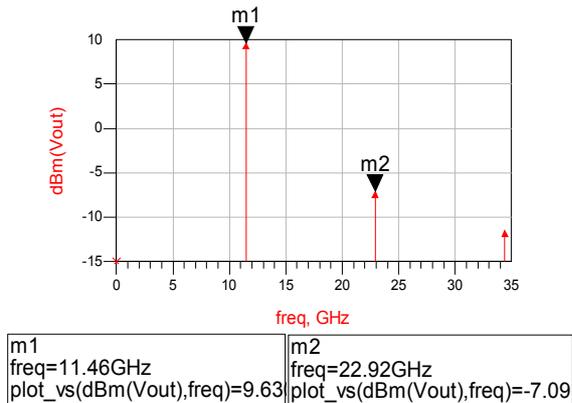


그림 10. 전압제어 발진기의 출력  
Fig. 10. Output of VCO

그림 11은 발진기의 성능을 나타내는 지표중의 하나인 트랜지스터의 열잡음이나 1/f 노이즈로 인한 위상 잡음(Phase noise)으로 100 KHz와 1 MHz 옵셋 주파수에서 각각 -88 dBc/Hz, -107.2 dBc/Hz로 양호한 성능을 가짐을 확인하였다.

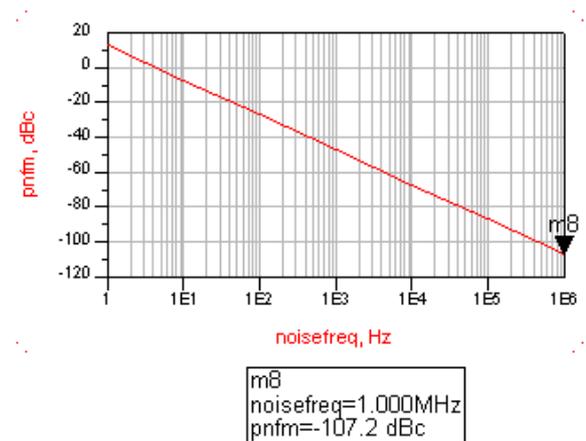


그림 11. 발진기의 위상잡음  
Fig. 11. Phase noise of oscillator

그림 12는 발진기부에 사용된 트랜지스터의 베이스 단자에 걸리는 전압을 4.25 V에서 4.80 V까지 증가시키면서 전압제어 발진기의 발진 주파수와 출력 전력을 본 것으로 4.25 V에서 4.80 V까지의 제어 전압에 의해 11.53 GHz에서 11.64 GHz의 주파수 동조 범위를 갖는다.

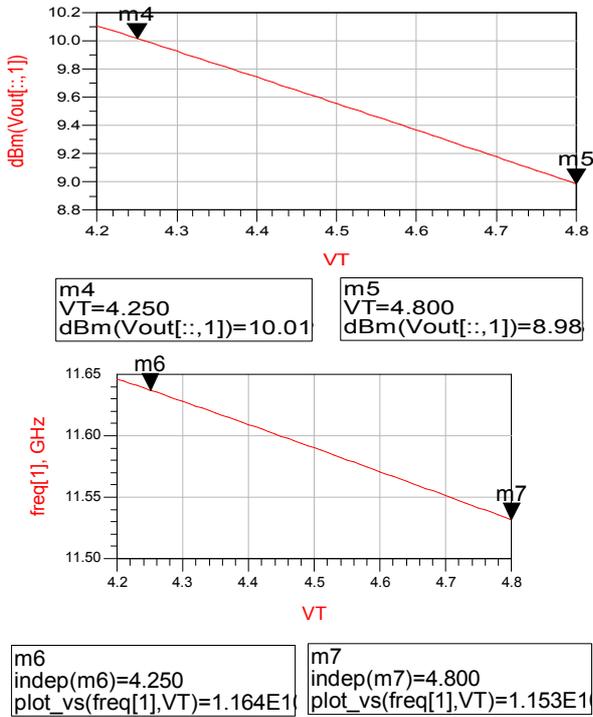


그림 12. 인가전압에 따른 주파수 변화 및 출력 변화  
Fig. 12. The variation of the frequency and output power for tuning voltage.

### 3-3 제작 및 측정 결과

다음 그림들은 본 논문에서 설계한 전압제어 발진기를 제작하여 측정한 결과로 그림 13에는 발진 주파수에서의 출력, 그림 14는 2차 하모닉 성분을 본 결과이다. 그리고 그림 15는 컬렉터 전압을  $V_{cc}=8V$  일 때 베이스 전압이 1.5 ~ 6.8 V까지 변화 시켰을 때의 출력 결과이다.

측정결과 발진출력은 11.459 GHz에서 -5.17 dBm으로 설계치와 많은 차이가 있었으며, 2차 하모닉과의 차는 -46.84 dBc로 약간의 차이를 보였고, 전체적인 주파수 또한 약간의 차이가 있었다.

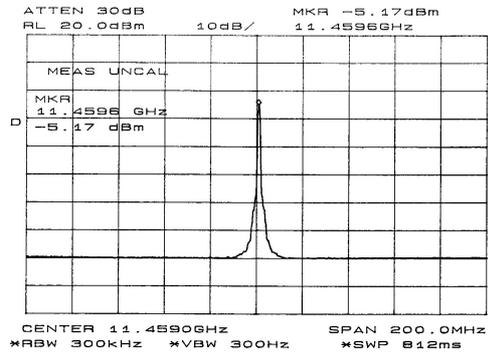


그림 13. 전압제어 발진기의 발진 주파수  
Fig. 13. The oscillator frequency of VCO..

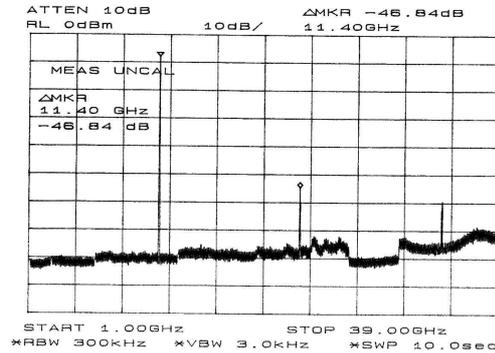


그림 14. 2차 출력 스펙트럼  
Fig. 14. The 2<sup>nd</sup> output spectrum

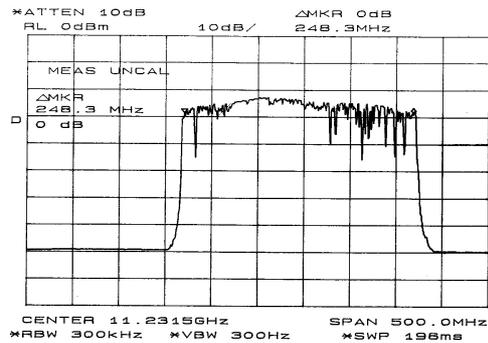


그림 15. 튜닝 전압에 의한 출력  
Fig. 15. The output by tuning voltage

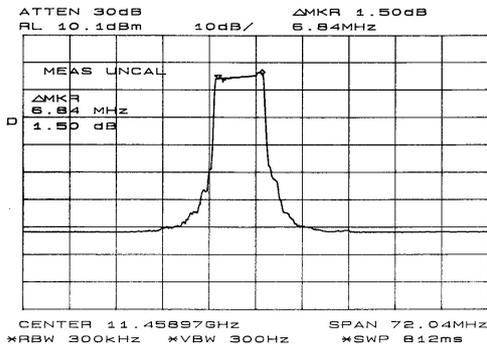


그림 16. 푸싱에 대해 주파수 변화  
 Fig. 16. The frequency transformation form pushing figure

그림 16에서처럼 DC 바이어스 전압 7.5 ~ 8.5 V 변화에 대한 pushing figure(Hz/V)에 대해서도 주파수 변동이 다소 있음을 확인하였다.

표 1. 모의실험 결과와 측정치 비교  
 Table 1. The measured value by comparison with simulation result

	모의실험	측정치
Oscillator Frequency	11.46 GHz	11.45 GHz
Output Power	9.63 dBm	-5.17 dBm
Vcc	8 V	8 V
Control Voltage	4.25~4.80 V	1.5~6.8 V
Frequency Range	11.53~11.64GHz	11.13~11.37GHz
Phase noise	-107.2 dBc @1MHz	-85 dBc @1MHz

표 1은 시뮬레이션 결과와 설계하여 측정된 결과의 비교표이며, 전체적으로 다소 차이가 있음을 볼 수 있다.

이는 어느 정도는 측정시 미흡한 환경의 영향이며, 논문에서 다루는 주파수가 높다는 점을 감안한다면, 약간의 노력을 하면 보완이 가능하리라 생각된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 infineon사에서 제공 해 준 Si-BJT BFP520(SOT343) 라이브러리를 모델링 하여 11.46 GHz인 X/Ku-Band 민수용 RD에 사용 가능한 전압 제어 발진기를 설계 및 제작하였다. 회로 구현에 있어서는 현재 추세인 소형화, 경량화, 저렴화의 장점을 가지도록 공진부에 바랙터 다이오드를 사용하지 않고 발진부에 사용한 단일 트랜지스터(Q2)의 베이스 단자에 가변 전압을 인가하여 주파수가 변하도록 전압 제어 발진기를 설계 하였다.

회로를 제작 할 때, 튜닝 작업이 편리 하도록 하기 위해 공진부에 Open Stub를 이용하여 설계하였으며, 유전율은 2.5이며, 두께는 0.5 mm인 Teflon 기판을 사용하였다.

설계에 있어서 Agilent Technologies 사의 ADS 를 이용하여 회로의 최적화 및 검증을 수행하였다. 최종적인 전압제어 발진기의 성능은 발진주파수 11.46 GHz에서 출력전력은 9.63 dBm, 2차 고조파의 출력전력은 -7.09 dBm을 나타냈으며 4.25 V에서 4.80 V까지의 제어 전압에 의하여 110 MHz의 주파수 동조범위를 보였다. 1 MHz 옵셋 주파수에서의 위상잡음은 -107.2 dBc/Hz의 우수한 특성을 나타내었으며, 주파수 푸싱 지수도 양호한 성능을 가짐을 확인하였다.

제작하여 측정된 결과 전체적으로 설계치와는 약간의 성능 차이가 있었으나, 이 차이는 설계 주파수가 높은 점을 감안한다면 측정시와 제작시의 오차일 것으로 판단된다. 설계치와 측정치를 보고 판단할 때 본 논문에서 제안한 구조의 VCO는 제작시에 약간의 주의만 있으면 사용화에 문제가 없을 것으로 판단된다.

향후 인접한 주파수 대역의 회로에 응용할 경우 적은 비용으로 높은 안정성을 갖지는 통신 시스템의 연구, 개발하는데 많은 도움이 되리라 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] G. Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifiers, analysis and design" Prentice Hall, Inc., 1996.
- [2] Matthew M. Radmanesh, "Radio Frequency and Microwave Electronics Illustrated" Prentice Hall, Inc., 2001 .
- [3] R Goyal, "Monolithic Microwave Integrated Circuits" Technology & Design, Artech House, Inc., 1989.
- [4] Kari Stadius, Risto Kaunisto and Veikko Porra "Monolithic Tunable Capacitors for RF Applications", IEEE, No 9/2001, pp 488-491
- [5] David M. Pozar, "Microwave and RF Design of Wireless Systems" John Wiley & Sons, Inc., 2001.

#### 강 석 엽(姜錫燁)



1997년 2월 : 인천대학교 전자공학과(공학사)  
 1999년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학석사)  
 2002년 2월 : 인하대학교 전자공학과(박사수료)

관심분야 : 무선통신 시스템 설계, 초고주파 회로설계, 안테나 설계

#### 고 민 호(高敏琥)



1995년 2월 : 여수대학교 전자통신공학과(공학사)  
 1997년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학석사)  
 2003년 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과(박사과정)

관심분야 : 무선통신 시스템 설계, 초고주파 회로 설계, RFIC 설계, 안테나 설계

#### 박 옥 기(朴昱基)



2002년 2월 : 상주대학교 전자전기공학과(공학사)  
 2004년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학석사)  
 2004년 2월~현재 : 인하대학교 전자공학과(박사과정)

관심분야 : 무선통신 시스템 설계, 초고주파 회로 설계, RFIC 설계, 안테나 설계

#### 박 효 달(朴孝達)



1978년 2월 : 인하대학교 전자공학과(공학사)  
 1987년:(불) 국립항공우주대학 전자공학과(공학박사)  
 1992년 ~ 현재 : 인하대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 항공통신 시스템 설계, 초고주파 회로 설계, 전자장 이론, 안테나공학