

GaAs MESFET를 이용한 K-밴드 Push-Push 전압제어 발진기

The K-Band Push-Push VCO Using GaAs MESFET

이현욱, 오경민, 오승연, 김영우,
(광운대학교 석사과정) (광운대학교 석사과정) (광운대학교 석사과정) (광운대학교 석사과정)
전봉욱, 윤기철, 남희, 이종철
(광운대학교 석사과정) (광운대학교 박사과정) (광운대학교 박사과정) (광운대학교 교수)

Key Words : harmonic oscillator, GaAs MESFET varactor

목 차

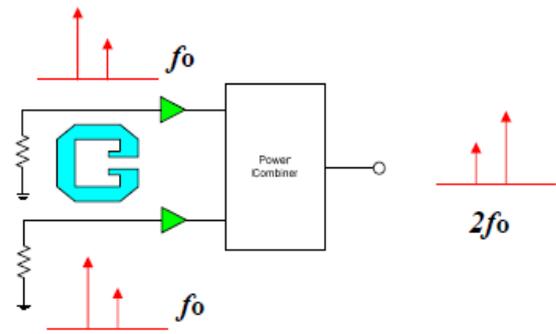
- I. 서론
- II. 제안된 구조의 push-push 발진기
- III. GaAs MESFET의 버랙터 구현
- IV. Push-push VCO 설계
- V. 결론
- 참고문헌

I. 서론

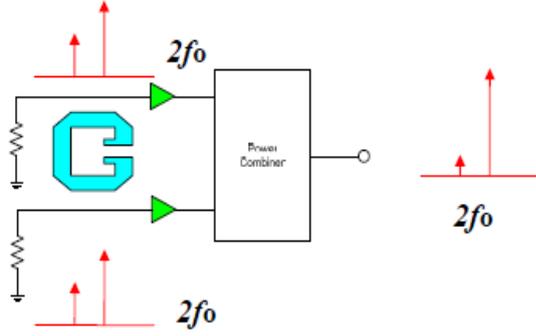
K-band 이상에서 높은 Q값을 가지는 공진기는 크기가 매우 작아 헤어핀 공진기처럼 특별한 구조로의 변형이 어렵다. 또한 트랜지스터 이득의 한계 때문에 기본 주파수로 발진하는 발진기 제작이 쉽지 않다. 그러나 동일한 트랜지스터 소자를 이용하면서 기본주파수의 2배 주파수에서 동작하고, 비교적 개발이 용이한 Push-Push 회로기술을 이용하면 트랜지스터의 차단주파수 특성한계를 극복할 수 있어 K-band 에서의 발진기 설계와 제작이 가능하다. 게다가 공진기를 원하는 동작 주파수의 1/2에서 동작하도록 만들어질 경우 Q값은 높고 만들기가 쉬우며 트랜지스터 발진기에 결합되기도 쉬워진다. 1985년에는 A.M. Pavio가 기존의 발진기에 비해 두 배의 발진 주파수를 얻을 수 있는 Push-Push 유전체 공진기 발진기를 만들었다[1]. 높은 Q를 갖는 DRO와 같은 발진기는 더욱 큰 안정도와 낮은 노이즈를 나타낸다. 그러나 이것은 상대적으로 좁은 주파수 범위를 갖는 전압제어 발진기에 사용된다. 그러므로, 이러한 발진기들은 일반적으로 전압제어 매커니즘에 민감하지 않은 회로들이다. 게다가 유전체 공진기는 Q값이 우수하나 3차원 구조를 갖고 있어 회로의 소형화와 다른 회로들과 집적이 어렵다. 본 논문에서는 집적이 용이한 마이크로 스트립 헤어핀공진기를 이용한 고조파 발진기로 이루어진 push-push 발진기를 설계하여 출력파워를 향상시켰으며 여기에 GaAs MESFET를 이용하여 VCO로 동작하도록 하였다.

II. 제안된 구조의 Push-push 발진기

Push-Push 구조에서 이론적으로 180도 위상차이를 갖는 기본파는 완전히 억압되어야 한다. 하지만 실제로는 완전히 억압되기가 어렵다. 전력결합기에서 위상차이가 완벽하게 180도가 되도록 제작하는것도 어렵고, 각각의 발진기를 구성하는 소자도 완벽하게 같은 소자라 볼 수가 없기 때문이다. 이러한 이유로 인해 <그림 1-a>에서 보이는 것과 같은 현상이 나타난다. 상대적으로 큰 출력의 기본주파수를 억압하는 데에도 한계가 있고, 낮은 출력을 갖는 2차 고조파 성분을 결합하기 때문에 최종 출력 또한 낮아진다는 문제점을 갖고 있다. 본 논문에서는 <그림1-b>와 같은 구조를 사용하였다. 각각의 발



(a)



(b)

그림 1. Push-push 발진기의 원리

(a) 일반적인 Push-Push 발진기

(b) 제안된 Push-Push 발진기

진기는 기본주파수를 억압하면서 2차 고조파 성분의 출력을 극대화시킨 고조파 발진기(harmonic oscillator) 구조를 갖는다. 이미 억압된 기본주파수를 Push-Push 구조를 통해 다시 한 번 억압시키기 때문에 상대적으로 우수한 특성을 보인다. 또한, 높은 출력의 2차 고조파 성분이 전력 결합기를 통해 결합되기 때문에 최종적으로 높은 출력레벨을 얻을 수 있다[2].

III. GaAs MESFET 바랙터 구현

GaAs MESFET가 3-Terminal 바랙터(Varactor)로 사용될 때, MESFET 등가회로 상에서 게이트-소스 커패시턴스 (C_{gs}), 게이트-드레인 커패시턴스 (C_{gd})와 드레인-소스 (C_{ds})의 세 개의 커패시턴스로 나누어 볼 수 있다. 본 논문에서 제안된 VCO에 사용하기 위한 3-Terminal GaAs MESFET 바랙터의 동작조건은 게이트-소스 전압 및 zero 드레인-소스 전압이며, 이 때, C_{gs} 와 C_{ds} 는 게이트에 인가된 전압으로 charge가 생성됨에 따라 성장된 depletion width가 게이트를 중심으로 소스와 드레인 사이에 동일하게 분포되어 거의 같게 되며 C_{ds} 가 훨씬 작게 된다[3,4]. 그러므로 드레인-소스 전류는 흐르지 않게 되며, 이 때를 드레인-소스 전류가 흘러 MESFET의 본래 동작을 하는 능동모드(active mode)에 반하여 수동모드(passive mode)라 하며 게이트에 인가된 전압이 변화하게 될 때, C_{ds} 가 변하지 않는 동안 C_{gs} 와 C_{gd} 가 변하게 된다. 이 경우 3-Terminal GaAs MESFET의 바랙터에서 사용할 수 있는 dominant한 커패시턴스는 C_{gs} 와 C_{gd} 가 된다[5]. 이 용량 성분 중 C_{gd} 와 C_{ds} 는 소자가 saturation 영역에 있을 경우 거의 일정한 값을 갖고 있다고 알려져 있고[6], C_{gs} 는 게이트와 드레인 전압에 의해 비선형적으로 증속되어 있음에도 불구하고 실제 소자가 동작하는 드레인 전압과 전류의 궤적인 부하 곡선위에서의 C_{gs} 의 변화는 거의 없으므로 선형 요소로 볼 수 있다[7]. <그림 2>는 GaAs MESFET가 수동 모드일 때 즉, MESFET의 드레인 전압이 인가되지 않았을 때의 등가회로이다. 3-Terminal GaAs MESFET 바랙터의 C_{gs} 와 C_{gd} 는

$$C_{gs} = C_{sp} + C_{ss} \quad (1)$$

$$C_{gd} = C_{dp} + C_{dd} \quad (2)$$

로 구성되며, 여기서 C_{sp} 와 C_{dp} 는 게이트-소스, 게이트-드레인 contact metalization으로 인한 커패시턴스이고 C_{ss} 와 C_{dd} 는 결합된 마이크로스트립 선로에 대한 closed-form 표현으로 쉽게 계산될 수 있다[8]. C_{ss} 는 게이트 전압과 드레인 전압 양쪽에 의존하지만 드레인 전압에 대한 의존은 비교적 적은 편이고 단지 게이트 전압에 의존한다고 가정하면 schottky diode depletion 커패시턴스로 표현될 수 있다[9]. 발진기에 응용하기 위한 전체 게이트 depletion 커패시턴스 C_g 는 C_{gs} 와 C_{gd} 의 합이므로,

$$C_{gs} = \frac{C_{so}}{\sqrt{1 - \frac{V_g}{V_b}}} + C_{sp} \quad (3)$$

$$C_{gd} = \frac{C_{go}}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_g}{V_b}\right) \cdot \left(1 - \frac{V_s}{V_{sat}}\right)}} + C_{dp}, \quad (\text{for } V_d < V_{sat})$$

$$= C_{dp} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 V_g 는 게이트에 인가된 전압이며 V_b 는 schottky barrier의 built-in 전압, V_d 는 드레인에 인가된 전압이며, V_{sat} 은 MESFET의 포화전압이다. C_{so} 는 제로 바이어스 조건 ($V_{gs}=0$, $V_{ds}=0$)에서의 게이트-소스 depletion 커패시턴스이며, 이 조건에서 C_{go} 와 동일하다고 가정한다. 이 커패시턴스는 주어진 조건에서 측정된 S-parameter를 통한 GaAs MESFET의 등가회로에 의해 구할 수 있으며,

$$C_{so} = \frac{\epsilon WL}{2A_o} = \frac{WL \sqrt{(\epsilon q N_d) / (2 V_b)}}{2} \quad (5)$$

로 표현된다. 여기서 W 는 게이트 금속단의 폭, L 은 게이트 금속단의 길이, q 는 이 조건에서의 전하량, N_d 는 active layer의 doping density, 그리고 A_o 는 V_{gs} 가 0V 일 때, 게이트 금속단 아래의 depletion width를 나타낸다.

IV. Push-Push VCO 설계

1. 고조파 발진기 설계

본 논문에서는 능동소자로 저 잡음 지수를 갖고 위상잡음을 최소화 할 수 있으며 부성저항을 쉽게 얻을 수 있는 GaAs MESFET인 HP Avantek사의 ATF-13786을 이용하였다. 기판은 $\epsilon_r=2.54$, $H=0.54$ mm, $T=0.018$ mm인 Teflon 기판을 사용하여 설계하였다.

발진기를 설계하기 위해서는 능동소자의 대신호 모델이 필

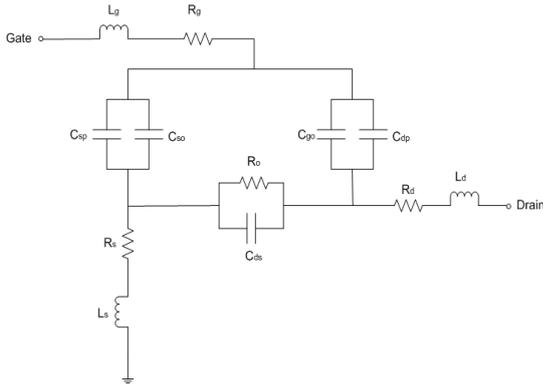


그림 2. $V_{ds}=0V$ 일 때의 GaAs MESFET의 등가회로

요하므로 비선형설계도구인 ADS를 이용하여 library에서 지원되는 비선형 모델로 설계를 하였다. 공진부는 헤어핀 공진기를 9.2 GHz 에 맞도록 설계하였으며, 발진기 형태는 회로 구성이 간단하고 부하변동에 따른 주파수 변화와 출력 변화가 작은 소스 직렬 케환형으로 하였다[10]. 이 때 마이크로스트립 전송라인에 결합한 공진기는 대역저지필터특성을 갖게 된다.

직렬 케환형 구조에서 발진기의 초기 발진가능성을 만족하도록 능동 케환 루프의 길이(l_3)와 헤어핀 공진기의 병렬결합선로(l_1, l_2)의 길이를 조절하여 기본주파수인 9.176 GHz에서 위상이 "0"을 교차하고 공진기와 결합선로와의 결합 간격을 조절하여 크기가 "1"보다 큰 값을 갖도록 최적화함으로써 초기 발진조건을 만족시켰다.(그림 3) 이때 게이트 단은 기생발진과 히스테리시스를 억제하기 위하여 50 옴으로 종단시켰다. 기본 주파수의 억제를 위해서 발진기의 출력단에 $\lambda_g/4$ 의 trap 회로를 첨가함으로써 9.2 GHz의 신호를 전기적으로 short시켰다. DC block은 Coupled line filter를 이용하여 구현하였으며, 기본주파수를 억압하면서 2차 고조파 성분은 통과시키도록 설계하였다. 또한 드레인단 이후의 DC feed 회로 역시 2차 고조파에 맞추어 설계하였다. 이와 같이 설계한 고조파 발진기를 이용하여 Push-Push 구조의 발진기를 모델링하였다.

2. VCO의 설계, 제작 및 측정

전압제어발진기는 그 발진주파수가 제어전압에 대해 선형적으로 변화하는 것이 가장 중요하다. 뿐만 아니라 위상안정도가 좋아야 하며, 주파수 조절이 용이하고, 저가 (Low Cost) 이어야 한다. 따라서 이 조건을 만족시키기 위해서 발진기에 사용된 소자와 같은 종류인 NEC사의 GaAs MESFET, NE72084를 이용하여 MESFET 바랙터로 동작하도록 하였다. 본 논문에서는 MESFET의 게이트 Depletion 커패시턴스 C_g 를 바이어스 전압 V_{gr} 을 가변시켜 본래의 공진 주파수 ω_0 를 새로운 공진주파수 ω_0' 로 바꿀 수 있다. 이에 따라 발진주파수를 동조시킬 수 있게 된다. 또한, C_l 의 길이 변화에 따라 공진주파수가 변화를 일으키므로 이를 조절하여 발진 주파수에 맞도록 조절하였다.

<그림 3>에 전압제어발진기의 회로도를 나타내었다. 헤어핀 공진기 부분에 기존의 바랙터 다이오드를 대신하여 GaAs MESFET을 바랙터를 삽입하여 VCO의 전압제어 주파

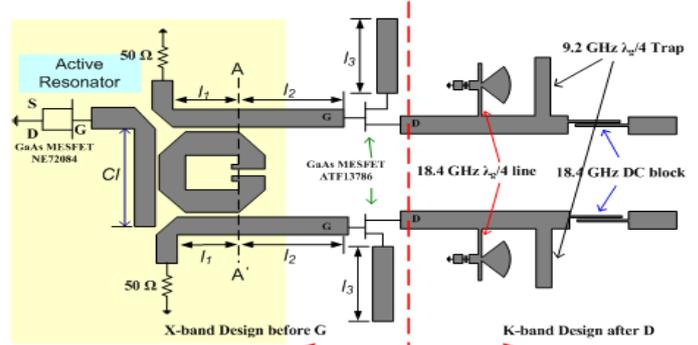


그림 3. GaAs MESFET 바랙터 push-push 전압제어 발진기의 레이아웃

수 변화부를 설계한다. MESFET 바랙터는 부하의 영향을 줄이기 위해 MESFET 바랙터 드레인단에 Zero 전위를 유지해 주어야 하며, 전압에 대한 주파수 변동이 선형이 되도록 하기 위해 MESFET 바랙터의 리액턴스 전압 V_{gr} 이 Pinch-off 전압 이하가 되도록 유지해주어야 한다. VCO는 전압에 대한 주파수 변화가 선형적이어야 하므로 공진기 사이의 세 선로 간의 간격은 공진주파수의 선형적 변화에 영향을 끼치므로 선로 간격을 최적화하여 MESFET 바랙터와 헤어핀 공진기 사이에 알맞은 Coupling이 이루어지도록 조정한다. 이해를 돕기 위한 주파수 튜닝 매커니즘 모델을 그림 4에 나타내었다.

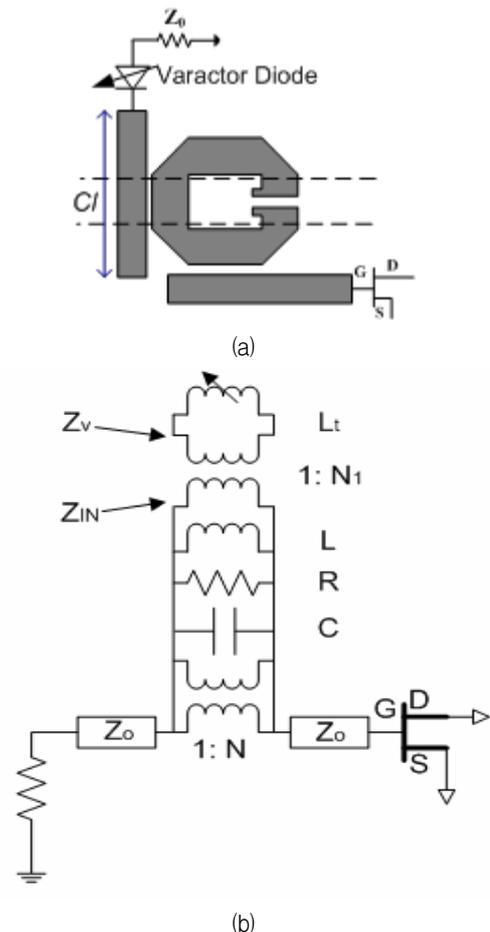


그림 4. 튜닝 매커니즘 모델

전압 제어 발진기는 주파수의 넓은 조절 범위를 얻기 위해서는 큰 조절비와 넓은 리액턴스 변화가 필요하다. 결국, 이러한 전압제어 메커니즘을 이용하여 헤어핀 공진기 결합구조에 적용시켜보면 그림 4와 같다. 헤어핀 공진기 결합구조에 두 개의 마이크로스트립을 두어 상호 인덕턴스와 상호 커패시턴스에 의한 결합을 유도한다. 상호 인덕턴스와 상호 커패시턴스를 변화시키기 위해서는 주로 위상잡음과 낮은 동조전력, 빠른 튜닝속도 특성을 갖는 GaAs MESFET 바랙터를 이용한다.

NE72084의 게이트 커패시턴스 부분에 0 V 에서 -3 V 까지 바이어스 전압을 인가하였을 때, 소신호 루프이득의 주파수 특성과 HB(Harmonic Balance)기법을 이용한 대신호 발진 주파수의 ADS시뮬레이션 결과를 표 1에 나타내었다. 대신호 발진 주파수가 소신호 상태에서의 결정된 주파수와 거의 일치함을 보이기 때문에 전압 제어구간 내에서 비교적 높은 Q 값이 유지되는 것을 예상 할 수 있다. 발진주파수 및 주파수 튜닝 범위 측정은 Agilent사의 E440A PSA Series Spectrum Analyzer를 이용하였다. 설계는 $V_{DD}=3$ V, $I_D=42.3$ mA에서 설계하였으나 바랙터 바이어스 $V_{GS}=-2.5$ V 이하부터 발진을 하지 않아 $V_{DD}=3.9$ V, $I_D=50$ mA 상에서 측정을 수행하였다. V_{GS} 가 0 V 부터 -2.5 V 까지 발진주파수가 15.17 MHz 만큼 가변되는 것을 확인하였으며, 이 때의 평탄도는 0.53 dB 이다. 그러나 -2.5 V부터 -3 V 까지 가변 시에는 출력전력이 급격히 떨어지는 현상을 보여 0에서-3 V 가변 시 19.25 MHz 만큼 주파수 전이가 발생하였으나 2.27 dB의 평탄도를 보였다. 주파수 튜닝 범위 측정 결과를 그림6, 7에 각각 나타내었다. 또한 0V, -2.5V, -3V에서 각각의 출력전력 및 위상잡음 특성을 표 2에 나타내었다.

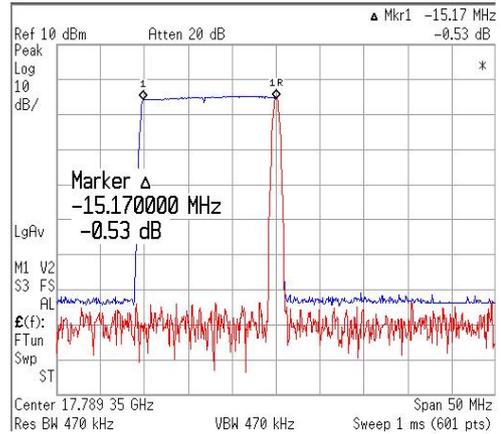


그림 6. VCO의 주파수 동조 (-2.5 V \leq $V_{GS} \leq$ 0 V)

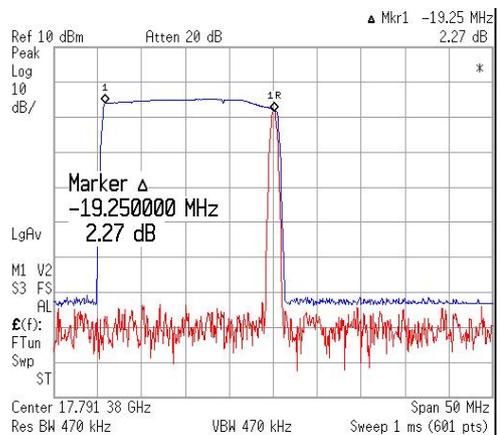


그림 7. VCO의 주파수 동조 (-3 V \leq $V_{GS} \leq$ 0 V)

표 1. ADS를 이용한 소신호 및 대신호 발진 주파수 비교

V_{GS} [V]	소신호 발진주파수 f_0 조사 [GHz]	대신호 발진주파수 f_0 [GHz]	출력파워 $2f_0$ [dBm]	f_0 억압 [dBc]
0	9.176	9.175	0.761	88.895
-0.5	9.177	9.176	0.921	85.548
-1	9.180	9.179	0.983	76.312
-1.5	9.184	9.183	1.030	66.957
-2	9.188	9.188	1.022	61.567
-2.5	9.193	9.193	0.429	63.893
-3	9.197	9.196	-1.794	69.304

표 2. V_{GS} 가변에 따른 출력전력 및 위상잡음

V_{GS} [V]	0	-2.5	3
발진주파수 [GHz]	17.772	17.789	17.791
위상잡음 @100kHz offset	-87.07 dB/Hz	-93.41 dB/Hz	-89.31 dB/Hz
위상잡음 @1 MHz offset	-116.92 dB/Hz	-121.5 dB/Hz	-117.60 dB/Hz
출력파워 [dBm]	-5.95	-5.19	-8.08

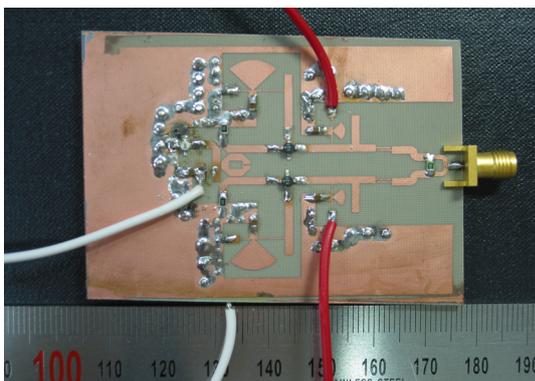


그림 5. push-push VCO의 제작사진

IV. 결론

본 논문에서는 K-밴드 대역에서 응용할 수 있는 push-push 발진기를 설계 및 제작하였으며, 바랙터 다이오드를 대신하여 GaAs MESFET를 적용시켜 push-push 전압제어 발진기를 구현하였다. 0 V에서 -3 V 까지 적은 전압의 변화만으로 발진주파수 동조 대역 범위를 약 19.25 MHz 정도 변화 시켰다. 그러나 출력전력은 -5 dBm 미만, f_0 억압도는 6 dBc 미만으로 좋지 않은 특성을 보였다. 이는 바랙터 기능 수행을 위한 라인의 추가로 인해 예측하지 못한 커플링이 발

생하여 대칭적인 구조가 틀어져 f_0 에서 위상이 상쇄되지 못하고 이어서 $2f_0$ 에서도 동위상으로 결합되지 못한 것으로 판단된다. 회로 레이아웃을 공진기중심으로 대칭적으로 디자인을 하고 추가로 발생하는 커플링을 줄인다면 출력전력과 주파수 역압 특성이 상승될 것이라 기대된다.

참고문헌

1. A. M. Pavio and M. Smith, "Push-push dielectric resonator oscillator," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 266-269, 1985.
2. H. W. Lee, S. W. Seo, K. C. Yoon, K. M. Oh, S. Y. Oh, H. Nam, and J. C. Lee, "Design of a new K-band push-push oscillator improving output power," *2008 IEEE AP-S Int. Symp. and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 438.7, July 2008.
3. W. R. Curtice, "A MESFET model for use the design of GaAs integrated circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 28, pp. 448-456, May 1980.
4. T. H. Chen and M. S. Shur, "A capacitance model for GaAs FETs," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 12, pp. 883-891, May 1985.
5. W. R. Curtice, and M. Ettenberg, "A nonlinear GaAs FET model use in the design of output circuits for power amplifier," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 33, pp. 1383-1394, Dec. 1985.
6. V. Hwang and T. Itoh, "An effective approach for large-signal modeling and analysis of the GaAs MESFET," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 35, pp. 396-402, April 1987.
7. Y. Tajima, B. Wrona, and K. Mishima, "GaAs MESFET large model and its application to circuit design," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 28, pp. 171-175, Feb. 1981.
8. K. C. Gupta *et al.*, *Microstrip Line and Slot Line*, Dedham, MA:Artech House, Chap. 3, 1992.
9. I. Bahl and P. Bhartia, *Microwave Solid State Circuit Design*, John Wiley & Sons, Chap 9, 1998.
10. G. D. Vendeline, A. M. Pavio, and V. L. Rodhe, *Microwave Circuit Design*, Wiley New York, pp. 219-228, 1990.