

축적형 버랙터의 RF 모델링 기법

김지활, 이승엽, 홍승호, 정윤하
포항공과대학교 전자전기공학과

A RF Modeling Technique of Accumulation Mode Varactor

Jeehwal Kim, Seungyup Lee, SeungHo Hong, Yoonha Jeong
Department of Electronics & Electrical Engineering
Pohang University of Science and Technology(POSTECH)
E-mail : first@postech.ac.kr

Abstract

본 논문에서는 주파수 1-7GHz 에서 게이트 바이어스가 0 2.0 ~ 2.0 V 일때 사용 가능한 축적형 버랙터(accumulation mode varactor)의 RF 모델링 기법을 제안하였다. 기존의 모델링 기법은 가변 커패시터가 존재하는 부분에서 임피던스의 실수성분이 일정한 값을 가지는 것으로 모델링 하였으나 소자의 측정결과를 통하여 실수성분이 일정한 값이 아닌 주파수에 따라 변화하는 값을 알았다. 이를 설명하기 위해서 기존의 모델링 기법에 커패시터와 저항을 하나씩 추가하여 새로운 모델을 구성하고 각각의 파라미터를 추출하였다.

I. 서론

최근의 CMOS 회로는 고속동작과 단일칩화가 대두되면서 RF 회로의 응용에 대한 관심이 급증되고 있다. RF 회로에서 주파수를 조절하는 전압제어발진기에 대한 연구가 활발히 보고되고 있다. 이러한 전압제어발진기의 발진주파수 제어를 위한 핵심구성 요소가 버랙터이다[1]. 버랙터는 높은 Q 지수(Quality Factor), 작은 면적, 높은 가변 정전용량(capacitance) 그리고 높은 최대최소 정전용량비율을 가져야 한다. 기존에 사용되던 pn 접합형 버랙터(junction varactor)에 비해 축적형 버랙터는 Q 지수가 높으며 보다 작은 면적을 차지한다[2]. 버랙터가 가져야 할 조건들을 고려해볼 때 접합형보다는 축적형 버랙터를 사용하는 것이 바람직하며 이에 대

한 모델링 기법이 다양하게 보고 되고 있다[2][3][4]. 하지만 이러한 모델링 기법들이 주파수에 대한 파라미터 변화를 설명하지 못하고 있는 실정이다.[2]

본 논문에서는 새로운 모델링 기법을 제안하여 이와 같은 문제점을 해결하고자 한다. 기존의 모델링 기법은 가변 커패시터가 존재하는 부분의 임피던스의 실수 부분이 R, L, C 가 직렬 연결되어 실수부분이 결정되므로 주파수에 따라 변화하지 않는 값을 갖게 된다. 이에 비해 측정값은 실수부분이 주파수에 따라 변화하여 기존의 모델링 기법으로는 설명 할 수 없다. 이처럼 축적형 버랙터에서 주파수에 따라 파라미터가 변화하여 해석하기 어려운 부분을 해결하기 위해 본 연구에서는 새로운 모델링 기법을 제안하고 각각의 파라미터 값을 도출하였다.

II. 소자의 구조와 측정

그림 1 은 축적형 버랙터의 단면도를 보여주고 있다. 본 연구에 사용된 소자는 0.18um CMOS 공정으로 제작되었으며 게이트 길이는 0.5um, 전체 게이트 폭은 144um(단일 게이트 폭 2um)이다. 산화막의 두께는 2.95nm 이며 측정영역에서 1.25pF 의 정전용량을 가진다. 소자는 벡터 회로망분석기(Anritsu, 37397C)와 프로브 스테이션(Cascade)을 사용하여 측정하였고, 단락회로(short)와 개방회로(open)를 이용한 2 단계 디임베딩(de-embedding) 과정을 통하여 소자만의 S-파라미터를 얻었다.

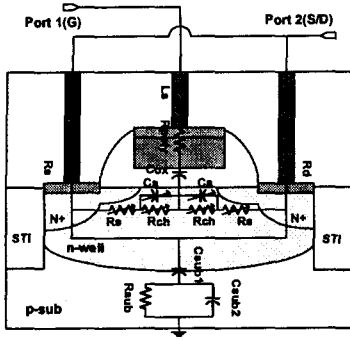


그림 1. 축적형 버랙터의 단면도

III. 제안된 모델링 기법

기판에 의한 손실이 크기 때문에 Q 지수를 크게 하기 위해 기판에 대한 모델링을 정확히 하여야 하는 인덕터와 달리 축적형 버랙터는 Q 지수가 충분히 크고, 기판이 버랙터의 특성에 미치는 영향이 적다. 따라서 그림 2의 Z2와 Z3에 대한 모델링은 기존의 모델링 기법들에서 제안한 것과 같이 저항과 커패시터로 표현하여도 무방하다. 또한 Z1의 허수부분 역시 그림 3에서 보는 바와 같이 주파수 1~7GHz에서 측정값과 일치하는 결과를 보여주고 있다. 다만 기존의 모델링 기법은 그림 2의 Z1 부분이 수동소자 R, L, C가 직렬 연결되어 실수부분이 저항 성분인 R에 의해서만 결정되므로 주파수에 무관한 값을 가지는 값으로 나타난다. 하지만 이와는 달리 측정된 값은 그림 3과 같이 Z1의 실수부분이 주파수에 따라 변화하는 값을 가진다. 이를 해결하기 위하여 그림 2와 같은 축적형 버랙터의 새로운 RF 모델을 제안한다.

그림 2의 각 구성요소를 살펴보면 다음과 같다. Rpoly는 게이트 바이어스와 무관한 폴리실리컨에 의한 저항이며 Ls는 게이트 연결에 의한 인덕턴스 값으로 수 pH 정도의 작은 값을 가진다. Cox는 산화막에 의한 정전용량이며 Cs는 공핍층(depletion region)에 의하여 만들어진 정전용량이다. Cox와 Cs는 직렬로 연결되어 그림 4의 유효정전용량을 결정한다. 이는 그림 2의 Z1의 유효정전용량이다. Rch는 공핍층의 채널의 저항이며, Rs는 소스로부터 공핍층에 이르는 채널저항으로 두 저항성분은 Cs와 함께 게이트 바이어스에 따라 변한다. 공핍상태에서는 공핍층을 통하여 채널 영역에 이르는 전하가 적으므로 Rch의 값이 크다.

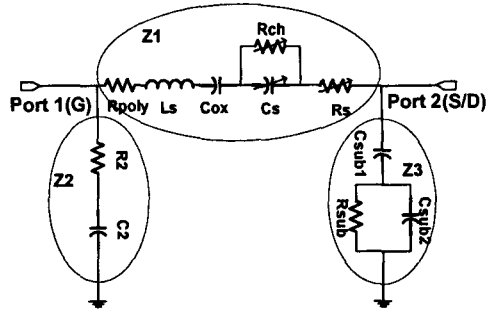


그림 2. 제안된 버랙터의 RF 모델

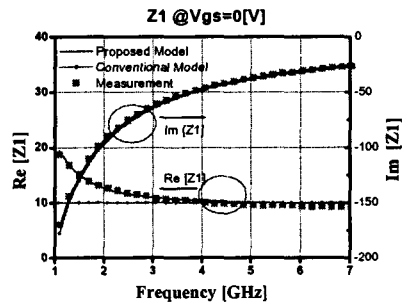


그림 3. 임피던스 Z1의 실수부분과 허수부분의 비교

이 경우 게이트의 전하량 변화는 공핍층의 증감에 주로 영향을 주어 채널의 직접적인 전하의 이동은 매우 적다. 그러나 이 저항은 큰 값을 가지므로 Z1의 실수 성분의 주파수 의존성에 매우 중요한 영향을 미친다. Cs는 공핍상태에서는 작은 값을 가지나 전압이 증가하여 축적상태가 되면서 Cs가 커지게 되어 축적상태에서는 Rch는 작아지게 된다. Z2는 게이트와 기판의 저항(R2)과 커패시터(C2)로 구성되었으며, Z3는 pn 접합에 의한 정전용량 Csub1, 기판의 저항 Rsub와 정전용량 Csub2로 구성되어 있다.

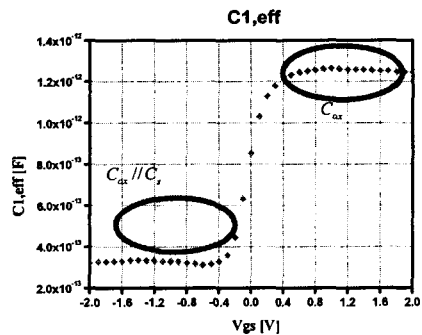


그림 4. Z1의 유효정전용량

IV. 파라미터의 추출과 토의

측정된 S-파라미터로부터 그림 2의 임피던스 Z1, Z2, Z3을 얻기 위해서 S-파라미터를 Y-파라미터로 바꾼 후 식(1), (2), (3)을 이용한다.

$$Y1 = -Y_{12} = -Y_{21} = 1/Z1 \quad (1)$$

$$Y2 = Y_{11} + Y_{21} = 1/Z2 \quad (2)$$

$$Y3 = Y_{22} + Y_{12} = 1/Z3 \quad (3)$$

그림 2의 제안된 버랙터의 RF 모델에서 Z2의 R2는 1400Ω 이상이며 C2는 8fF 이하이다. 저항값은 크고 정전용량은 매우 작아서 Z2는 개방되었다고 간주하여도 무방하다. Z3의 실수부분과 허수부분은 식(4), (5)와 같다. 식(4)의 2GHz 이하의 낮은 주파수에서 Rsub를 구할 수 있으며, 이를 통하여 Csub2를 구할 수 있다. 이미 구한 Rsub와 Csub2를 이용하여 식(5)에서 Csub1을 추출한다.

$$\text{Re}[Z3] = \frac{R_{sub}}{\omega^2 C_{sub2}^2 R_{sub}^2 + 1} \quad (4)$$

$$\text{Im}[Z3] = -\frac{1}{\omega C_{sub1}} - \frac{\omega C_{sub2} R_{sub}^2}{\omega^2 C_{sub2}^2 R_{sub}^2 + 1} \quad (5)$$

Z1의 실수부분과 허수부분을 나누어 구하면 식(6), (7)과 같다.

$$\text{Re}[Z1] = R_s + R_{poly} + \frac{R_{ch}}{1 + \omega^2 C_s^2 R_{ch}^2} \quad (6)$$

$$\text{Im}[Z1] = \omega L_s - \frac{1}{\omega C_{ox}} - \frac{C_s R_{ch}^2}{1 + \omega^2 C_s^2 R_{ch}^2} \quad (7)$$

$$R_{poly} = R_{sh} W_f / 3 N_f L_f \approx 0.2 \Omega \quad (8)$$

게이트의 폴리실리콘저항을 소거하고[5], 게이트 바이어스가 축적상태일 때 Z1의 유효정전용량은 Cox에 의존하므로 Z1의 허수성분을 통하여 Cox를 쉽게 구할 수 있다. 식(6)에서 높은 주파수에서 Z1의 실수 성분은 Rs에 의존함을 알 수 있다. 각각의 게이트 바이어스에 따른 Rs를 구한 후, 유효정전용량과 Cox로부터 Cs를 얻고 식(6)으로부터 이미 구한 Rs, Cox, Cs를 대입하여 Rch를 추출한다. 마지막으로 식(7)로부터 이미 구한 값들을 이용하여 게이트 바이어스에 따라 변하지 않는 값인 Ls를 구할 수 있다. 그림 5는 추출된 Rs와 Rch 값을 보여주고 있다. Rch는 3절에서 언급한 바와 같이 공핍상태에서 2780Ω 정도의 높은 값을 가진다. 하지만 바이어스가 증가하여 축적상태에 이르

면 1Ω 정도의 낮은 값을 갖는다. Rs역시 공핍상태에서의 값이 축적상태에서의 값보다 두배 이상 큰 값을 가지는 것을 그림 5에서 볼 수 있다. 그림 6는 Cs의 추출 값을 보여준다. 위와 같이 추출된 파라미터의 값을 표 1에 도시하였다.

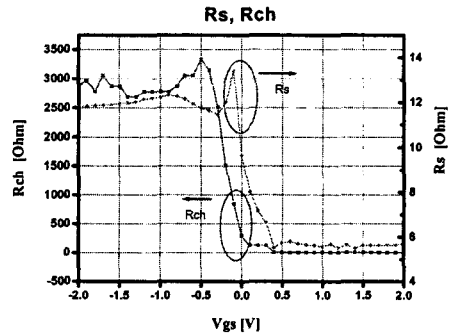


그림 5. 추출된 Rs, Rch

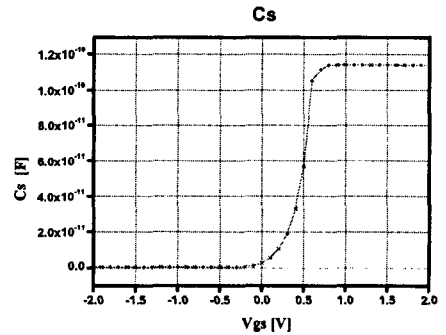


그림 6. 추출된 Cs

	기존의 모델		제안된 모델	
	공핍	축적	공핍	축적
Rs(Ω)	14	6	12.3	5.6
Cs(pF)	0.33	1.25	0.44	114
Ls(pH)	4.5	4.5	4.44	4.44
Rch(Ω)	-	-	2780	1.1
Cox, (pF)	-	-	1.25	1.25
Csub1(pF)	0.175	0.175	0.175	0.175
Rsub(Ω)	70.2	70.2	70.2	70.2
Csub2(pF)	0.195	0.195	0.195	0.195

공핍 : 공핍상태, 축적 : 축적상태

표 1. 추출된 파라미터

추출된 파라미터들을 이용하여 전산모사 한 결과 그림 2 의 Z1 의 실수부와 허수부가 각각의 바이어스에서 일치하는 결과를 보여주었다. 그림 3 은 $V_{gs}=0[V]$ 에서 Z1 의 허수부분과 실수부분이 1-7GHz 의 주파수에서 측정값과 전산모사된 값이 일치함을 보여주고 있다. 그림 7 은 $V_{gs}=-1[V]$ 에서 그림 8 은 $V_{gs}=1[V]$ 에서 측정된 S-파라미터와 제안된 RF 모델링 기법에 의하여 추출된 파라미터에 의하여 전산모사된 S-파라미터가 일치하는 결과를 각각 보여주고 있다.

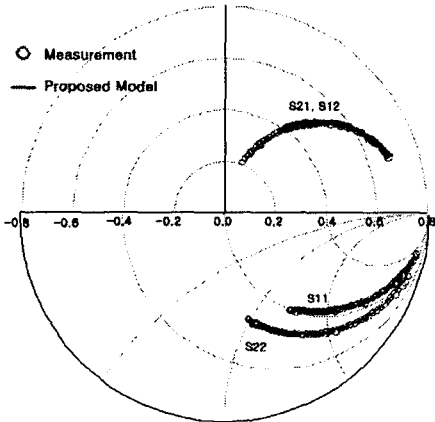


그림 7. S-파라미터 ($V_{gs}=-1.0[V]$)

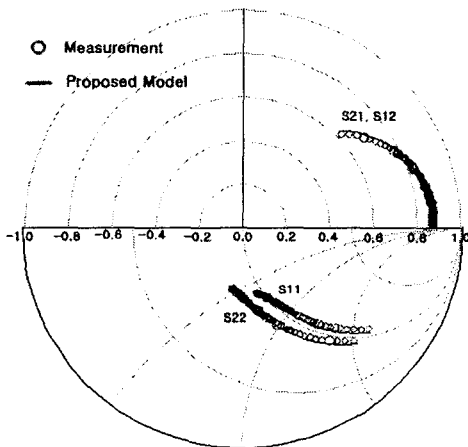


그림 8. S-파라미터 ($V_{gs}=1.0[V]$)

V. 결론

본 논문에서는 축적형 버랙터에서 파라미터가 주파수에 따라 변화하는 것을 설명해 줄 수 있는 새로운 RF 모델링 기법을 제안하였다. 주파수에 따라 변화하는

파라미터를 설명하지 못하였던 기존의 모델링 기법과는 달리 본 논문에서는 공핍상태와 축적상태에서 값을 달리 하는 파라미터들을 제안하여 이를 설명하고 각각의 파라미터를 측정된 S-파라미터로부터 도출하였다. 제안된 축적형 버랙터의 RF 모델링 기법은 1-7GHz 의 주파수대역에서 V_{gs} 가 0 2.0~2.0 V 인 영역의 축적형 버랙터를 모델링 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 “나노기술 기반의 차세대 산업화 핵심요소기술개발사업”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] P. Andreani and S. Mattison, “On the use of MOS varactors in RF VCO’s”, IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 35, pp. 905-910, Jun. 2000.
- [2] T. Soorapanth, C. P. Yue, D. K. Shaeffer, T. H. Lee, and S. Simon Wong, “Analysis and optimization of accumulation-mode varactor for RF IC’s”, Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical papers, pp. 32-33, 1998.
- [3] K. Molnar, G. Rappitsch, Z. Huszka, and E. Seebacher, “MOS varactor modeling with a subcircuit utilizing the BSIM3v3 model”, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 49, no. 7, pp. 1206-1211, Jul. 2002.
- [4] S.C. Rustagi, C.C.C. Leung, “Accumulation mode MOS varactor SPICE model for RFIC applications”, Electronics letters, Vol. 36, No. 20, Sept. 2000
- [5] C. Enz, “An MOS Transistor Model for RF IC Design Valid in All Regions of Operation”, IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, Vol. 50, No. 1, pp. 342-359 Jan. 2002