

논문 2010-47SD-6-2

회로 시뮬레이션을 위한 유기물 쇼트키 다이오드 모델링

(Modeling of Organic Schottky Diodes for Circuit Simulations)

김 호 종*, 남바야르 바타르*, 김 시 호**

(Hyojong Kim, Nyambayar Baatar, and Shiho Kim)

요 약

유기물 쇼트키 다이오드 회로 설계시에 사용가능한 소자의 모델을 구현하였다. AHDL을 이용하여 상용 CAD 환경으로 보편적으로 사용되는 Spectre의 설계환경에서 측정 결과를 입력 파라미터로 반영하여 회로 시뮬레이션을 할 수 있는 환경을 구성하였다. 유기물 RFID의 구현에 필수적인 정류회로를 제작하여 회로의 주파수 특성을 측정하였으며, AHDL 모델을 사용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 제작된 정류회로의 주파수 특성은 13.56MHz의 RFID 동작을 만족시키기에는 부족하지만, 135kHz 주파수 대역 RFID에서는 동작이 가능하다.

Abstract

A semi-empirical organic schottky diode model is proposed for circuit simulation. We have set up a full custom design environment for organic schottky diode circuit using Spectre AHDL, which is widely used commercial EDA tool. We measured frequency response from fabricated rectifier, and it was compared to circuit simulation results using the AHDL model. The frequency response of the fabricated rectifier circuit is not sufficient for 13.56MHz RFID, however, it is enough for 135KHz-band RFID.

Keywords : Organic Schottky Diode, simulation model, AHDL, Printed RFID

I. 서 론

유기 반도체 소자는 가볍고, 잘 휘어지는 특징을 가지고 있으며, 잉크젯 방식의 인쇄 공정으로 대량 생산이 가능하여 원가 절감의 효과가 기대 되고 있어서 차

세대 반도체 재료로써 주목 받고 있다^[1]. 현재, 유기물 반도체는 인쇄 무선인식소자(Printed RFID), 유연한 디스플레이(Flexible Display), 유기물 태양 전지 등에 활용 가능하도록 연구되고 있다. 유기물 반도체 인쇄 기술을 이용하여 RFID 태그를 제작한다면, 제조비용을 획기적으로 낮출 수 있고, 단가가 높지 않은 상품에도 RFID를 부착함으로써 물류 유통분야에서 바코드를 대체할 수 있을 것으로 예상된다^[2].

유기물 반도체를 이용한 RFID 회로의 개발을 위해서는 유기물 쇼트키 다이오드를 이용한 정류 회로가 가장 중요한 요소가 된다. 유기물 쇼트키 다이오드를 포함한 회로의 개발을 위해서는 유기 반도체 소자의 회로 시뮬레이션 모델이 필수적이다. 본 논문에서는 회로 시뮬레이션을 위한 유기물 쇼트키 다이오드의 모델을 제시하였으며, AHDL (Analog Hardware Description Language)^[3]을 이용하여 Cadence 설계 환경에서 회로

* 학생회원 충북대학교 전기공학부
(Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University)

** 평생회원-교신저자, 충북대학교 전기공학부 & 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소
(Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University)

※ 본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업(전력IT)의 연구결과입니다. 유기물 반도체 소자 샘플 제작을 도와주신 전자통신연구원(ETRI) 인쇄소자전자연구팀에 감사드립니다. 본 연구에서는 IDEC이 지원하는 CAD tool을 사용하였으며 지원에 감사드립니다.

접수일자: 2010년2월10일, 수정완료일: 2010년5월22일

시뮬레이션 가능하도록 환경을 구현하였다. 본 논문에서는 제작된 유기물 쇼트키 다이오드로부터 모델 파라미터를 추출하고, 제작된 Organic 정류회로의 동작과 시뮬레이션 결과를 분석하였다.

II. 본 론

1. 유기물 쇼트키 다이오드 제작 공정

유기물 쇼트키 다이오드는 그림 1에서 보여주는 단면구조를 갖으며, 유기물 반도체로는 펜타신(Pentacene) 또는 P3HT 등이 주로 사용된다^[2, 4~5]. 제조 과정에서는 유연성을 갖는 플라스틱 계열의 기판위에 먼저 양극 패

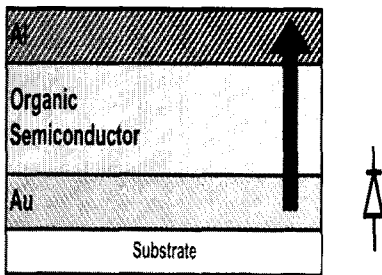


그림 1. 유기물 쇼트키 다이오드의 단면도
Fig. 1. Cross section of Organic Schottky Diode.

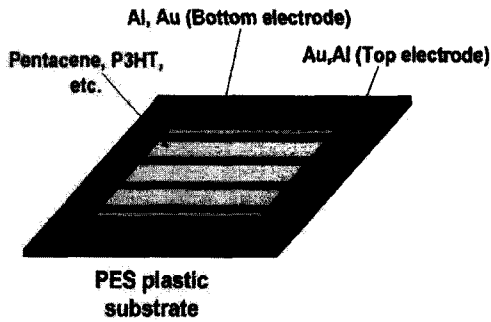


그림 2. 유기물 쇼트키 다이오드의 Test pattern
Fig. 2. Test pattern of Organic Schottky diodes.

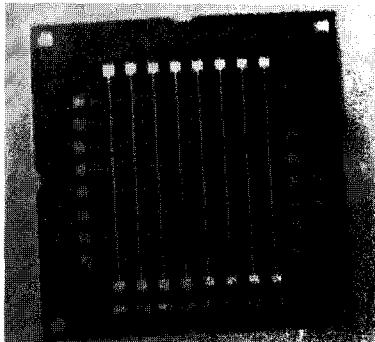


그림 3. 본 연구에서 제작한 칩
Fig. 3. Fabricated diode array in this work.

턴(Au)을 잉크젯 프린팅으로 형성하고, 유기 반도체를 도포하고, 음극 전극(Al)을 형성한다. 유연성을 갖는 기판 위에 잉크젯 등의 프린트 공정을 이용하여 소자의 패턴을 형성할 수 있으므로 유기물 쇼트키 다이오드는 구부러지는 유연한 프린팅 소자(flexible printed device)의 실용화에 매우 중요한 소자이다.

그림 1은 유기물 쇼트키 다이오드의 테스트 패턴의 입체도이고, 그림 3은 제작된 유기물 쇼트키 다이오드의 사진이다. 펜타센을 이용한 유기물 쇼트키 다이오드의 측정 결과와 모델 수식(Analytic Model)은 참고문헌 [5]에서 처음으로 제시되었다.

2. 유기물 쇼트키 다이오드 모델

유기물 쇼트키 다이오드의 전류-전압 측정 데이터를 보면 일반 실리콘 기반의 다이오드의 지수함수 그래프보다는 이차함수에 가까운 결과 파형을 보인다. 참고문헌 [5]에서는 $L=160\text{nm}$ 인 펜타센 유기물다이오드의 측정값으로부터 전류-전압 관계식을 경험적으로 모델링 하였다.

$$I_{diode} = A \frac{9\epsilon_0\epsilon_r u V_d^2}{8L_D^3} \tag{식1}$$

식(1)에서, A는 단면적, L_D 는 다이오드의 채널길이, ϵ_0 은 유전 상수, ϵ_r 은 유기물의 유전율, u 은 이동도, L_D 는 채널의 길이를 나타내는 파라미터이다. 참고문헌 [3]에서 측정값으로부터 환산한 이동도의 크기는 $0.15\text{cm}^2/\text{Vsec}$ 이다.

경험적 모델 식(1)에서는 다이오드가 순방향 바이어스일 때만 해당되고, 역방향 바이어스 영역에서는 적용할 수 없어서 회로 시뮬레이션을 위한 모델로는 적용할 수 없다. 본 연구에서 제작된 펜타센 유기물 쇼트키 다이오드의 측정 결과를 살펴보면 식(1)과 같이 전류-전압 특성 곡선이 이차 함수 그래프와 유사함을 알 수 있다. 이 측정결과를 바탕으로 [5]에서 발표된 경험적 모델을 참조하여 유기물 쇼트키 다이오드의 모델식을 유도하였다.

$$\begin{aligned} J_d &= M_{u1} V_d^2 + N_{T1} V_d, \text{ for } V_d \geq 0 \\ &= M_{u2} V_d^2 + N_{T2} V_d, \text{ for } V_d < 0 \end{aligned} \tag{식2}$$

M_{u1} 과 M_{u2} 는 각기 V_d 가 양인 구간과 음인 구간에 서의 유기물의 이동도, 채널길이와 관련된 파라미터로

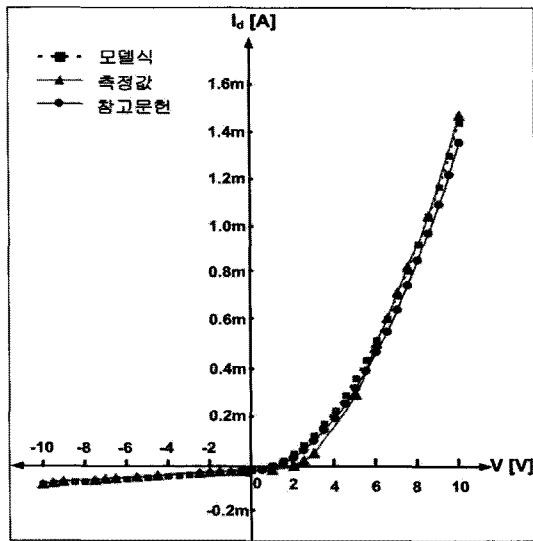


그림 4. 유기물 쇼트키 다이오드의 선형영역 I-V 그래프

Fig. 4. linear plot of I-V curve for Organic Schottky Diode.

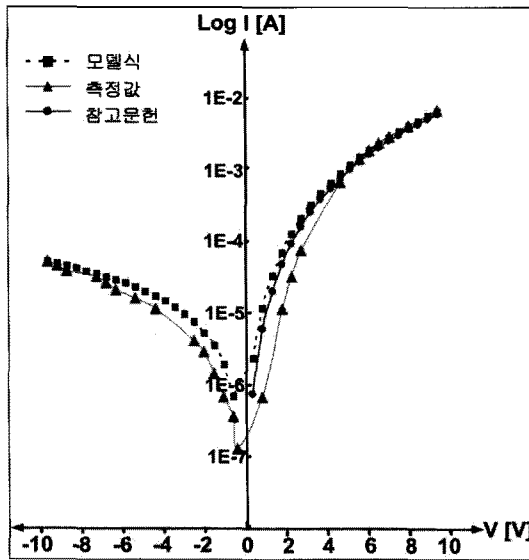


그림 5. 유기물 쇼트키 다이오드의 log scale I-V 그래프

Fig. 5. log scale plot of I-V curve for Organic Schottky Diode.

서 식(1)의 모델 식에서 $\frac{9\epsilon_0\epsilon_r u}{8L_D^3}$ 항에 관련된 파라미터

이고, N_{T1}, N_{T2} 는 다이오드의 fitting 파라미터이다.

소자 모델을 회로 시뮬레이션에 적용하기 위해서는 인가전압의 전 구간에서 모델 식 및 모델 식의 미분 값이 연속하여야 한다. 식 (2)에서는 $V_d=0$ 일 때, 전류가 연속됨을 알 수 있으며, 미분값이 $V_d=0$ 에서 연속하기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

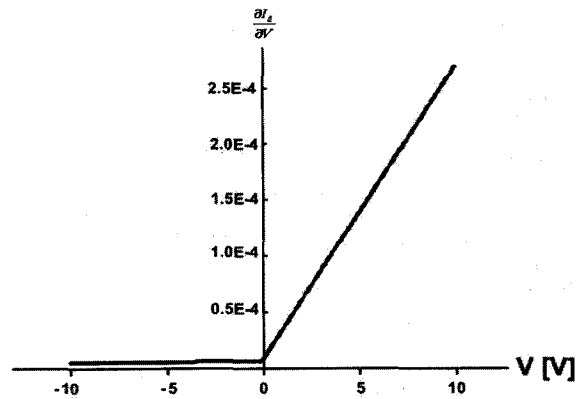


그림 6. 유기물 쇼트키 다이오드 모델로부터 시뮬레이션한 전달 컨덕턴스 $\frac{\partial I_d}{\partial V}$ 특성

Fig. 6 Spectre simulated trans-conductance versus Vd plot for Organic Schottky Diode.

$$|2M_{u1} V_d + N_{T1}|_{V_d=0} = |2M_{u1} V_d + N_{T2}|_{V_d=0}$$

$$N_{T1} = N_{T2} = N_T \tag{식3}$$

제작된 유기물 쇼트키 다이오드로부터 측정된 파라미터 값을 적용하여, 참고문헌 [5]의 경험적 모델 식(1) 및 본 논문의 모델 식 (2)와 측정결과를 비교하였다. 그림 4는 선형 척도, 그림 5는 로그 척도에서 전류-전압을 비교한 그래프이다. 그림 4와 5를 살펴보면, 본 논문에서 제안한 모델 식은 순방향 바이어스와 역방향 바이어스에서 모두 실제 측정치와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 6은 모델링한 유기물 쇼트키 다이오드의 모델 식에 대한 전류-전압 곡선의 미분 값의 연속성을 보여주는 그래프이다.

3. AHDL을 이용한 설계 환경 구축

AHDL은 사용자가 직접 소자의 동작 모델 방정식을 모델 파라미터로 설정하여 코딩하고, 이를 이용하여 spectre 회로 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 사용자가 만든 모델을 상용 EDA 프로그램에서 적용하기 위해서는 Spectre® HDL(Spectre Hardware Description Language) 또는 Verilog-A® 를 사용하면 되고, 이들은 표준 AHDL을 지원하고 있다^[2]. 본 논문에서는 유기물 쇼트키 다이오드의 모델 방정식을 Spectre® AHDL을 이용하여 기술하였고, 상용 CAD 환경으로 보편적으로 사용되는 Cadence의 Composer®의 표준 설계 환경에서 입력 파라미터를 통하여 소자의 측정 결과를 소자 파라

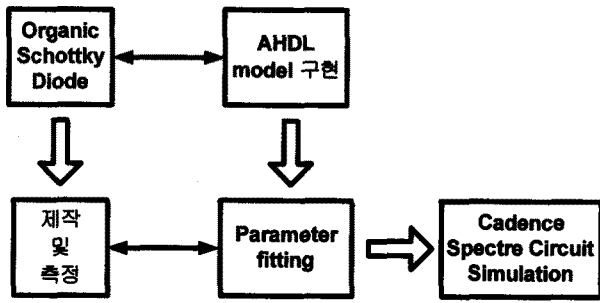


그림 7. AHDL을 이용한 사용자 모델의 설계환경 구축
 Fig. 7. Design environment with user defined model using AHDL.

표 1. 유기물 쇼트키 다이오드의 AHDL 모델 구현
 Table 1. Implemented AHDL model of the organic shottky diode.

```

module organic_diode (PLUS, MINUS) (MU1, NT, MU2)
node [V, I] PLUS, MINUS;
parameter real MU1=0.036764705 from [0:inf);
parameter real NT=4.362112235 from [0:inf);
parameter real MU2=7.62847294 from [0:inf);
{
real Id, Vd;
analog {
Vd = V(PLUS, MINUS);
Id = I(PLUS);
if (Vd < 0) {
I(PLUS, MINUS) <- ((-1)*MU2*pow(Vd,2)+NT*Vd);
}
else{
I(PLUS, MINUS) <- (MU1*pow(Vd, 2)+NT*Vd);
}
}
}
    
```

미터에 직접 반영하여 회로 시뮬레이션을 할 수 있는 환경을 구성하였다.

본 논문에서 적용한 Cadence 설계 환경은 Cadence에서 Library 환경 구축 뒤, SpectreHDL-editor를 이용하여 모델 식을 AHDL로 구현한다. AHDL의 코딩을 마치면 모델링한 소자의 심볼과 포트를 생성할 수 있으며, 이를 이용하여 회로 설계 및 시뮬레이션이 가능하다.

III. 실험

모델링한 유기물 쇼트키 다이오드를 RFID 태그 설계에 적용하기 위하여 간단한 정류회로를 구현하고 시뮬레이션 하였다. 그림 3의 제작한 유기물 쇼트키 다이오드에 R과 C를 연결하여 구성한 정류회로로부터 측정한 전압 값과 시뮬레이션 값을 비교하였다. 그림 9는 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 그래프이다. 입력 신호의 주파수가 100kHz 정도까지는 두 결과가 거의 유사함을 확인 할 수 있다. 하지만 1MHz 근방의 주파수에서는 측정값이 시뮬레이션 값보다 작아지면서 오차가 커진다. 이는 정류회로의 기생 캐피시턴스 성분을 회로에 반영하지 못했기 때문으로 판단된다. 측정된 그림8의 정류 회로에서 유기물 쇼트키 다이오드와 C가 동일 기판에 제작되지 못하였다. 현재, 기생 성분을 줄이기 위해서, RFID 태그 회로 구현 시 모든 공정을 프

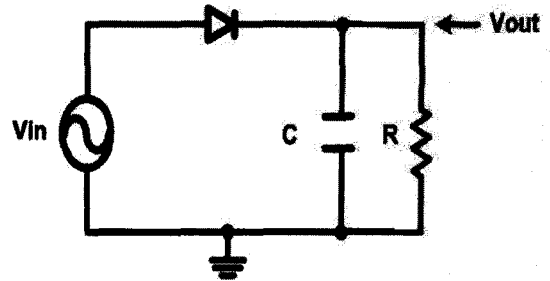


그림 8. 간단한 Rectifier 회로
 [Vin=10V, C=100nF, R=50kΩ]
 Fig. 8. Simple Rectifier circuit.
 [Vin=10V, C=100nF, R=50kΩ]

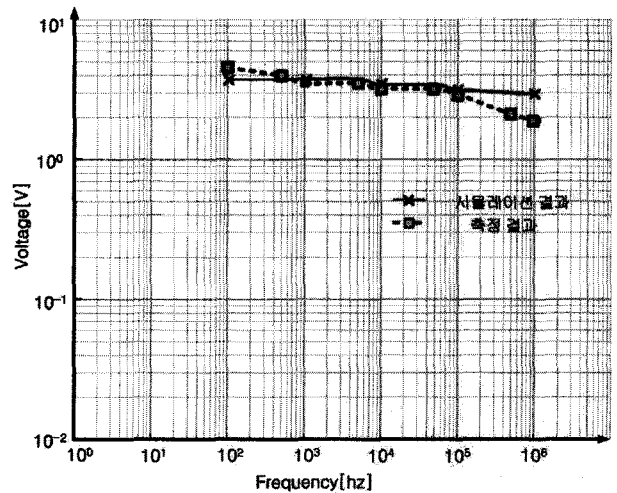


그림 9. Organic Schottky Diode rectifier의 주파수 특성
 Fig. 9. Frequency characteristic of Organic Schottky Diode rectifier.

린트 공정으로 제작하고, 캐패시터와 다이오드의 on-chip으로 제작하는 공정이 개발 중이다. 다이오드와 C를 on-chip으로 제작한다면, 기생 성분에 의한 영향을 줄여서 AHDL 모델을 이용한 회로의 AC 시뮬레이션 결과와 측정 결과의 오차를 줄일 수 있을 것으로 예측된다.

그림 9의 주파수 특성을 보면, 제작한 다이오드는 13.56MHz RFID에 적용하기에는 아직 부족한 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 제작한 정류회로의 주파수 특성이 좋지 않은 가장 큰 원인은 앞서 언급한바와 같이 제작된 회로의 기생 용량 값이 수 나노 F 정도로 너무 크기 때문인 것으로 판단된다. 제작된 유기물 쇼트키 다이오드의 정류회로는 주파수 특성이 아직 13.56MHz RFID 동작에는 미흡하지만 다이오드와 수동소자를 on-chip으로 제작한다면 수 MHz이내에서 동작할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서 유기물 반도체 소자를 이용한 회로 설계를 위한 유기물 쇼트키 다이오드 소자를 모델링하였다. 제안한 모델 방정식을 Spectre® HDL을 이용하여 AHDL로 기술하였고, 상용 CAD 환경으로 보편적으로 사용되는 Cadence의 Composer®의 표준 설계환경에서 입력 파라미터를 통하여 측정 결과를 파라미터에 직접 반영하여 회로 시뮬레이션을 할 수 있는 환경을 구성하였다. 제작된 정류 회로로부터 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 제작된 유기물 쇼트키 다이오드의 정류회로는 주파수 특성이 아직 13.56MHz RFID 동작에는 미흡하지만 135KHz 대역 RFID로는 충분한 동작특성을 가지고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 이문석, "C60(buckminsterfullerene) 홀주입층을 적용한 유기박막트랜지스터의 성능향상", 전자공학회 논문지-SD편 제5호, pp. 19-25, 2008. 5
- [2] K. Myny, et. al, "An Inductively-Coupled 64b Organic RFID Tag Operating at 13.56MHz with a Data Rate of 787b/s", ISSCC 2008, pp. 290-291.
- [3] Spectre™ AHDL Manual, Cadence design system
- [4] Klaus Dimmler, "Printed RFID Technology,"

Organic Electronics Conference & Exhibition, 2006.

- [5] Soeren Steudel, K. Myny, V. Arkhipov C. Deibel, S. Vusser, J. Genore and P. Heremans, "50MHz rectifier based on an organic diode" Nature Materials, vol. 4 (2005), pp. 599-597.

— 저 자 소 개 —



김 효 종(학생회원)
2008년 충북대학교 전자공학
학사졸업
2008년~2010년 충북대학교
전기공학과 석사졸업
<주관심분야 : Organic device
modeling, System On Chip
Design, RFID>



Nyambayar Baatar(학생회원)
2006년 몽골 과학기술대학교
전기공학과 학사 졸업
2009년 충북대학교 전기공학과
석사 졸업.
2009년 현재 충북대학교 전기
공학과 박사과정 재학
<주관심분야 : System On Chip Design>



김 시 호(전자공학회 평의원, 평
생회원, IEEE Senior member)
1986년 연세대학교 전자공학과
학사졸업
1988년 KAIST 전기 및 전자
공학과 석사졸업
1991년~1995년 KAIST 전기 및
전자공학과 박사졸업
1988년~1991년 LG반도체 중앙연구소
주임연구원
1995년~1996년 LG반도체 중앙연구소
책임연구원
1997년~2005년 원광대학교 부교수
2000년~2001년 2월 IMEC 연구소(KU Leuven)
초빙 교수
2005년~현재 충북대학교 전기공학부 교수
2009년~현재 하이브리드자동차 에너지회생기술
연구센터 (ITRC) 센터장, System Chip
Integration (SCI)연구실 운영
<주관심분야 : System on Chip Design, 하이브
리드 자동차 에너지 회생기술, 3DIC 냉각 기술,
Flash Memory>