

## 무선전력전송을 위한 에어 코어 기반의 트랜스포머 제작

### Fabrication of the Micromachined Transformer based on Air Core for the Application of Wireless Power Transmission

김성태<sup>1</sup>, 차두열<sup>1</sup>, 강민석<sup>1</sup>, 조세준<sup>1</sup>, 장성필<sup>1,a</sup>

(Sung-Tae Kim<sup>1</sup>, Doo-Yeol Cha<sup>1</sup>, Min-Suck Kang<sup>1</sup>, Se-Jun Cho<sup>1</sup>, and Sung-Pil Jang<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

Air core based transformers have been designed, simulated and fabricated by using micromachining process for the application of wireless power transmission with the range of frequency from 1 GHz to 20 GHz. Fabricated transformers are the types of solenoid transformers with primary and secondary coils. the size of fabricated transformer is 1.1 X 1.5~2.15 mm including ground shield. Transformers have been measured by dividing two groups based on the turns ratio between primary coil and secondary coil which are 1:1 transformers(the number of turns of primary coil and secondary coil: 3/3, 5/5, 7/7) and 1:n transformers(the number of turns of primary coil and secondary coil: 3/3, 3/6, 3/9). As a result of the measurement, the lowest insertion loss of transformers ranged from 2 dB to 2.8 dB according to the number of turns between primary coil and secondary coil. And the lowest insertion loss from the transformers was measured at the frequency from 7 GHz to 11 GHz according to the number of turns between primary coil and secondary coil. Based on the measurement data from the microfabricated transformers, the transformer with the 3/3 turns in the primary coil and secondary coil showed best performance compared to others in terms of lowest insertion loss, lowest insertion loss frequency and bandwidth.

**Key Words** : Micro transformer, Air core, Wire power transmission

#### 1. 서론

무선전력전송 기술은 전력 에너지를 무선 전송에 유리한 마이크로파로 변환시켜 에너지를 전달하는 새로운 개념의 전력 전송 방식으로 전기 에너지를 전선 없이 공간을 통해 보낼 수 있는 전파 전송의 원리이다[1].

무선전력전송을 위한 구성성분은 크게 두 가지로 구분하며, 마이크로파를 발생시키는 발진회로와 송전 안테나로 구성된 송신부와 수신 안테나와 정류회로로 구성된 수신부로 나누어진다. 본 논문

에서는 수신부에 쓰이는 DC-DC 컨버터의 트랜스포머를 구성하는 것이며, 전자기기의 소형화 추세에 맞물려 소형화가 필요한 수동 소자이다.

기존의 CMOS 공정을 이용한 트랜스포머의 소형화는 수동 소자와 기판 사이에 캐패시턴스 커플링과 전자기 효과(와전류 등등)으로 인해 트랜스포머 효율에 나쁜 영향을 미치게 된다. 이러한 점을 보완하기 위해 최근 각광받고 있는 MEMS 공정을 이용하여 3D 형태의 솔레노이드 트랜스포머를 제작하고자 한다.

무선전력전송 시스템의 사용 주파수는 대기 중의 잡음특성상 10-300 MHz와 20-60 GHz주위의 주파수 대역에서 잡음의 영향이 가장 심하기 때문에 1-20 GHz으로 저 잡음 주파수대역을 사용하는 것이 일반적이다. 트랜스포머의 특성상 MHz대역까지는 전자기 유도를 위해 높은 투자율과 히스테

1. 인하대학교 전자공학과  
(인천시 남구 용현동 253)

a. Corresponding Author : spchang@inha.ac.kr

접수일자 : 2008. 10. 30

1차 심사 : 2008. 12. 16

심사완료 : 2008. 12. 22

리시스 곡선이 soft 형태를 갖는 Magnetic Core가 필요하지만, GHz대역에서는 Core의 와전류 손실, 히스테리시스 손실, 기생 캐패시턴스 등 여러 가지 특성으로 인해, 에어를 코어로 사용하는 트랜스포머 개발의 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 마이크로머시닝 기술을 이용하여 무선전력전송 시스템의 실효 주파수 대역인 1~20 GHz대역에서 높은 성능을 가지며 에어를 코어로 하는 트랜스포머를 설계하고, 시뮬레이션을 거쳐서 직접 제작하여 트랜스포머의 성능을 측정하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 트랜스포머 설계

트랜스포머는 유도성 전기 전도체를 통해 전기 에너지를 한 회로에서 다른 회로로 전달하는 장치를 말하며, 그림 1과 같이 권선 수가 다른 2개의 코일로 구성된다. 트랜스포머는 전기 회로의 정합을 취하여, 전기적인 효율 증가를 꾀하고, 1,2차 코일의 전압을 변화시켜 그것에 따른 전류의 감소 또는 증가를 시키기 위해 사용된다.

그림 2는 트랜스포머의 등가회로를 나타내었다. 트랜스포머는 두 개의 코일(Lp, Ls)로 구성되어 있으며, 1차 코일에서 발생하는 magnetic flux에 의해 전력은 2차 코일로 전송되게 된다. 도선에 의한 저항은 Rp, Rs로 표시되며 코일과 직렬로 연결되어 있다. 두 코일 간의 커플링 캐패시터인 Ccouple는 주파수가 높아질수록 큰 기생 효과를 나타낸다. 기판에 의한 효과는 Rsub, Csub으로 표시되며, 기판에 의한 와전류 효과를 감소시키려면 Rsub이 큰 물질을 쓰는 것이 좋다. Csub은 마찬가지로 주파수가 높아지면 큰 기생효과를 나타낸다. 마지막으로 측정 위한 단자는 Port 1, Port 2로서 나타낼 수 있다.

트랜스포머의 성능은 S 파라미터로 나타낼 수 있다. S 파라미터는 주파수 영역에서의 입력 출력 간의 전력비를 나타내주는 지표로서 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 S11, S22는 반사계수이고 S12, S21은 투과계수이며, 트랜스포머는 1차 코일에서의 입력단과 2차 코일에서의 출력단 간의 전력관계를 보기 위하여 S21 파라미터를 주로 측정하게 된다.

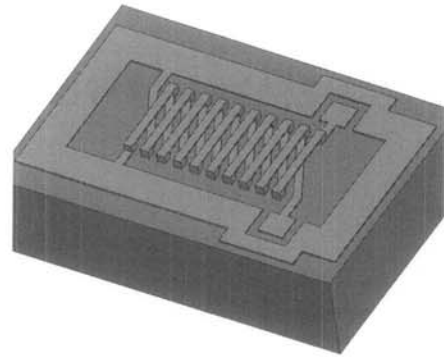


그림 1. 트랜스포머 시뮬레이션 모델.  
Fig. 1. Transformer simulation model.

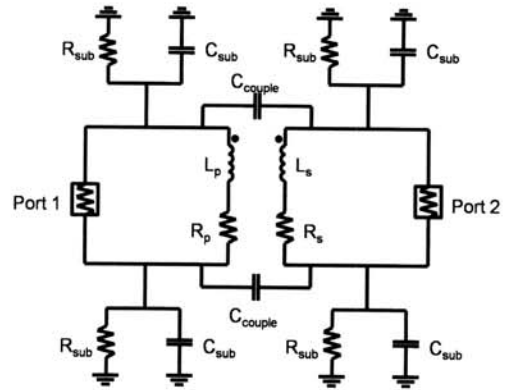


그림 2. 트랜스포머 등가회로.  
Fig. 2. Equivalent circuit of transformer.

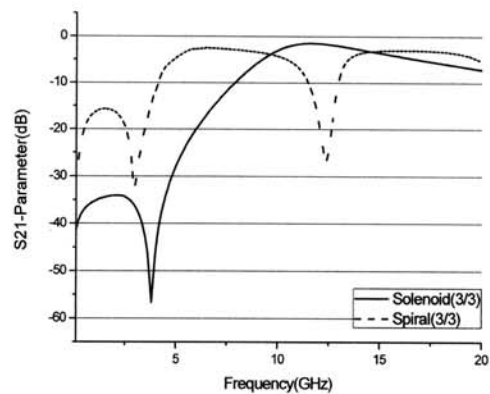


그림 3. 솔레노이드와 스파이럴 트랜스포머의 S21 파라미터 특성.  
Fig. 3. S21 parameter characteristic of solenoid and spiral transformer.

트랜스포머의 설계 변수를 결정하기 위해 HFSS (High Frequency Structure Simulation)을 이용하여 그림 1과 같은 구조를 구성하여 시뮬레이션 하였다. 그 결과 그림 3과 같이 최저 삽입손실과 bandwidth 측면에서 스파이럴 형태보다는 솔레노이드 형태가 더 높은 성능을 갖는 것으로 나타났으며, 트랜스포머의 설계 변수를 line width는 50  $\mu\text{m}$ , length는 500  $\mu\text{m}$ , height는 10  $\mu\text{m}$ 이고 post height는 30  $\mu\text{m}$ 이며, 턴 수를 조정하여, 설계하였다. 설계한 트랜스포머의 시뮬레이션 결과를 토대로 비교 검토하여 최적 트랜스포머 구조를 설계할 수 있었다.

**2.2 제작**

트랜스포머들은 크게 1차 코일과 2차코일의 턴 수의 비가 1:1, 1:n인 두 가지 종류로 구분하여 제작되었다. 턴 수에 따른 효과를 알아보기 위해, 1차 코일과 2차 코일의 턴 수가 각각 3/3, 3/6, 3/9, 5/5, 7/7인 트랜스포머를 제작하였다. 제작 과정은 그림 4의 (a)-(f)에서 나타내었다.

트랜스포머의 제작 순서는 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 실리콘 기판 위에 입출력 단자 및 인덕터 하부 코일의 Seed layer를 형성하기 위하여, Ti(30 nm)/ Cu(200 nm)을 RF sputter를 이용하여 증착하였다(그림 4(b)). 인덕터 하부 코일의 두께를 10  $\mu\text{m}$ 로 하기 위하여 photoresist AZ4620을 1500 rpm의 속도로 스핀 코팅, exposing과 developing을 통하여 10  $\mu\text{m}$  높이의 mold를 형성하였다. 그리고 mold를 통한 Copper post 형성을 위하여 전기도금 방법을 이용하였다. 전기 도금은 표 1에서 보인 Cu bath를 이용하여 60  $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 50 mA의 전류로 15분 정도 흐르게 하여 수행하였다(그림 4(c)).

3차원 구조의 솔레노이드 인덕터를 만들기 위한 Post는 30  $\mu\text{m}$  이상의 높이로 두껍게 제작해야 하기 때문에 이를 위해서 photoresist AZ4620를 두 번의 스핀 코팅과 exposing 및 developing을 통하여 mold가 형성되었다. 그리고 Cu bath 안에서 50 mA의 전류가 40~50분정도 공급되어 Cu post가 형성되었다(그림 4(d)). 상부 금속 도선을 제작하기 위해 다시 Ti(30 nm)/Cu(200 nm)의 Seed layers가 증착되었다. 그리고 10  $\mu\text{m}$  높이의 상부 금속 도선을 제작하기 위해 photoresist AZ4620을 이용하여 mold를 제작하고 Cu 도선이 전기도금을 통하여 형성되었다(그림 4(e)).

마지막으로 Top seed layer와 mold를 형성하기 위해 사용된 photoresist를 아세톤을 이용하여 lift

off방식으로 제거하였다(그림 4(f)). 그리고 bottom seed layer는 Cu etchant와 Ti etchant를 사용하여 제거하면, 최종적으로 그림 5와 같은 Solenoid형 트랜스포머를 제작할 수 있다.

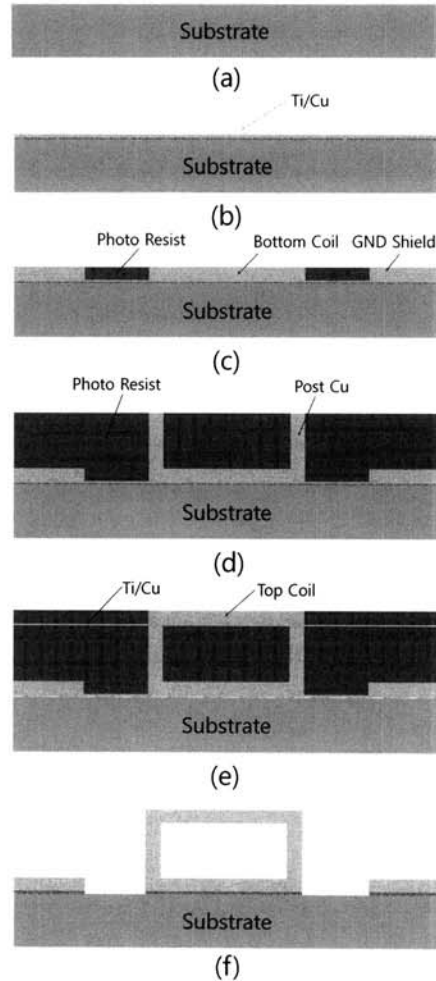
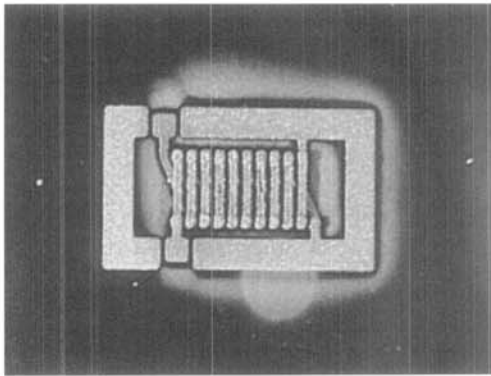


그림 4. 솔레노이드 형 트랜스포머 제작 과정.  
Fig. 4. Fabrication process of solenoid type transformer.

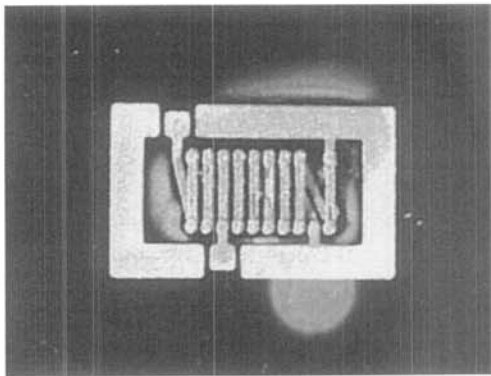
표 1. Cu bath 구성 성분표.

Table 1. Cu bath composition.

Cu Bath 구성	사용량
CuSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O(Cupric Sulfate)	375 g
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Sulfuric Acid)	75 g
DI Water	1500 ml



(a) 1:1 트랜스포머 사진



(b) 1:n 트랜스포머 사진

그림 5. 제작된 솔레노이드형 트랜스포머 사진.  
Fig. 5. Image of fabricated solenoid type transformer.

### 3. 결과 및 고찰

앞의 공정 과정을 통해 실리콘 기판 위에 제작된 트랜스포머는 트랜스포머의 1차 코일과 2차코일의 턴 수를 변수로 하여 턴 수의 비가 1:1 트랜스포머와 1:n 트랜스포머 두 개의 그룹으로 나누었다.

트랜스포머의 S-parameter 측정을 위해 Agilent 8510c Vector Network Analyzer, GSG probe, probe station을 사용하여 0.1 GHz에서 20 GHz대역의 주파수 특성을 조사하여 simulation 결과와 비교해 보았다.

#### 3.1 턴 수의 비가 1:1인 트랜스포머

턴 수의 비가 1:1인 트랜스포머들은 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 서로 같은 트랜스포머들로 턴 수가 3/3, 5/5, 7/7의 트랜스포머들로 구성되어 있다.

최저 삽입손실은 세 종류의 트랜스포머들에서 약 2 dB정도로 세 종류 모두 다 거의 비슷한 결과를 보였다. 최저 삽입손실 주파수는 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/3이 11.5 GHz으로 가장 높았으며, 턴 수가 5/5가 8.5 GHz, 턴 수가 7/7이 7 GHz로 턴 수가 높아질수록 최저 삽입손실 주파수는 낮아짐을 알 수 있었다. 그리고 Band width 그림 6의 (a)에서 보는 바와 같이 턴 수가 늘어날수록 점점 줄어드는 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

#### 3.2 턴 수의 비가 1:n인 트랜스포머

1차 코일과 2차코일의 턴 수의 비가 1:n인 트랜스포머들로는 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/3인 트랜스포머를 기준으로 하여 2차 코일의 턴 수를 2배인 6턴, 3배인 9턴으로 늘려서 3/6, 3/9의 턴 수를 갖는 트랜스포머들로 구성되어 있다.

최저 삽입손실은 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/3인 트랜스포머가 2 dB로 가장 낮음을 보였고, 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/6인 트랜스포머는 2.25 dB, 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/9인 트랜스포머는 2.8 dB로 1차 코일에 비하여 2차코일의 턴 수가 증가할수록 삽입손실이 증가함을 알 수 있었다. 또한 최저 삽입손실 주파수파수는 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/3이 11.5 GHz으로 가장 높았으며, 턴 수가 3/6인 트랜스포머는 10.5 GHz, 턴 수가 3/9인 트랜스포머는 9 GHz로 1차 코일에 비하여 2차코일의 턴 수가 높아질수록 최저 삽입손실 주파수는 낮아짐을 알 수 있었다. 그리고 Band width는 1차 코일과 2차코일의 턴 수의 비가 1:1 트랜스포머들보다 1:n인 트랜스포머들이 대체로 넓은 대역을 갖는 형태를 보였으며 1차 코일에 비하여 2차코일의 턴 수가 늘어날수록 Bandwidth가 점점 줄어드는 현상을 보임을 이 실험을 통하여 알 수 있었다.

### 4. 결론

본 논문에서는 무선전력전송의 실효 대역인 1 GHz ~20 GHz 대역의 주파수에서 동작하는 에어 코어를 기본으로 한 트랜스포머를 설계하여 micromachining 공정을 이용하여 직접 제작하였다.

제작된 트랜스포머는 솔레노이드 형태의 트랜스포머로 기존의 스파이럴 형태의 트랜스포머보다 더 뛰어난 성능을 나타냄을 알 수 있었고, 1차 코일과 2차코일의 턴 수가 3/3인 솔레노이드 형태의 트랜스포머가 2 dB의 최저 삽입 손실을 보였으며,

참고 문헌

[1] 박정훈, "마이크로파 무선전력전송을 위한 렉테나 설계와 구현", 조명·설비학회논문지, 20권, 6호, p. 43, 2006.

[2] Cendoya. I., de No. J., and Garsia-Alonso. A., "A new methodology for the on-wafer characterization of RF integrated transformers", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, p. 1046, 2007.

[3] Hsu, H.-M., Tsai, M.-C., and Huang, K.-H., "An on-chip transformer in silicon-based technology", Journal of micromechanics and microengineering, Vol. 17, No. 8, p. 1504, 2007.

[4] L. Gu and X. Li, "High-performance CMOS-compatible solenoidal transformers with a concave-suspended configuration", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, p. 1237, 2007.

[5] J. R. Long, "Monolithic transformers for silicon RF IC design", IEEEJ. Solid-State Circuits, Vol. 35, No. 9, p. 1368, 2000.

[6] N. Fong, J. Plouchart, N. Zamdmer, J. Kim, K. Jenkins, C. Plett, and G. Tarr, "High-performance and area-efficient stacked transformers for RF CMOS integrated circuits", in IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. dig., Vol. 2, p. 967, 2003.

[7] H. Jiang, Z. Li, and N. Tien, "'Reducing silicon-substrate parasitics of on-chip transformers", in IEEE Int. Microelectromech. Syst. Conf. Tech. Dig., p. 649, 2002.

[8] J. Y. Park, Y. S. Eo, and J. U. Bu, "Surface micromachined RF inductors and transformers for advanced telecommunication applications", European Microwave Conference 2002, 32nd, p. 1, 2002.

[9] K. T. Ng, B. Rejaei, and J. N. Burghartz, "Substrate effects in monolithic RF transformers on silicon", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 50, No. 1, p. 377, 2002.

[10] J.-W. Kim, E.-J. Yun, Y.-C. Jung, and C.-H. Hong, "A study for solenoid-type RF chip inductor", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 13. No. 10, p. 840, 2000.

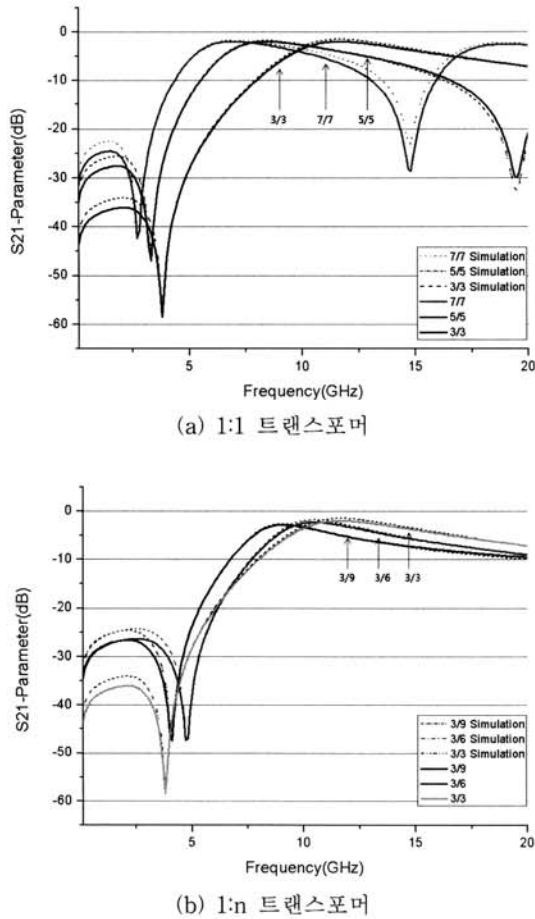


그림 6. 트랜스포머의 S21 주파수 특성.  
Fig. 6. S21 frequency characteristic of transformer.

최저 삽입 손실 주파수는 1차 코일과 2차코일의 턴 수의 변화에 따라 7 GHz에서 11 GHz로 측정되었다. 1차 코일과 2차코일의 턴 수의 비가 1:1 트랜스포머들과 1차 코일과 2차코일의 턴 수의 비가 1:n 트랜스포머들을 측정 비교해본 결과, 대체로 1차 코일에 비하여 2차코일의 턴 수가 증가할수록 삽입 손실, 최저 삽입 손실 주파수 및 Band width가 점점 감소하는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00387).

- [11] J.-B. Lee and K.-H. Kim, "Fabrication of micromachined on-chip high ratio air core solenoid inductor", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 19, No. 8, p. 780, 2006.
- [12] H.-S. Kim, J.-S. Song, and Y.-W. Oh, "Impedance properties of thin film inductors by fabricated wet etching method", J. of KIEEME (in Korean), Vol. 10, No. 8, p. 813, 1997.
- [13] R. P. Ribas, J. Lescot, J.-L. Leclercq, J. M. Karam, and F. Ndagihimana, "Micromachined microwave planar spiral inductors and transformers", IEEE trans. Microwave Theory Tech, Vol. 48, p. 2415, 2000.
- [14] J.-B. Yoon, Y.-S. Choi, B.-I. Kim, Y. S. Eo, and E. S. Yoon, "CMOS-compatible surface-micromachined suspended-spiral inductors for multi-GHz silicon RF ICs", IEEE Electron Device Lett., Vol. 23, p. 591, 2002.
- [15] T. Biondi, A. Scuderi, E. Ragonese, and G. Palmisano, "Analysis and modeling of layout scaling in silicon integrated stacked transformers", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 54, No. 5, p. 2203, 2006.
- [16] Martincic E., Figueras E., Cabruja E., Dufour-Gergam E., and Woytasik M., "Magnetic micro-transformers realized with a flip-chip process", Journal of Micromechanic and Microengineering, p. 1455, 2004.
- [17] K. Chong and Y. Xie, "High-performance on-chip transformers", IEEE Electron Device Lett., Vol. 26, No. 8, p. 557, 2005.
- [18] Clark T. C. Nguyen, Linda P. B. Katehi, and Gabriel M. Rebeix, "Micromachined devices for wireless communications", Proceeding of the IEEE, Vol. 86, No. 8, p. 1756, 1998.