



하이브리드 인쇄 전자 기술을 이용한 고주파 무선 전력 수확기

I. 서론

인쇄 기술은 우리의 삶 속에서 쉽게 접할 수 있다. 수 많은 사적/공적 문서와 신문 등 정기간행물이 매일 같이 인쇄되고 있고, 티셔츠에 새겨진 재미난 캐릭터와 그림들도 인쇄 기술을 통해서 우리들의 일상 생활에서 친근하게 다가온다. 최근에는 염료를 인쇄하는 것을 넘어서 3D 프린팅 기술이 상용화되면서 예술 모형부터 생체 조직, 전자기기 패키지까지도 인쇄되고 있다. 이처럼 고도화된 인쇄 기술을 통해 누구나 다양한 물질들을 원하는 형태와 구조로 손쉽게 인쇄할 수 있게 되면서, 기술의 파급력은 상상을 초월하게 되었다. 그리고 인쇄 기술의 장점에 힘입어 그 역할이 4차 산업혁명의 핵심이자 주변의 사물과 환경에 지능과 기능성을 부여하는 사물인터넷 (IoT) 기술 연구에 있어 많은 기대와 주목을 받고 있다.

근래에는 금속과 중합체(Polymer) 잉크를 이용하여 간단한 인덕터, 축전기부터 비선형 물질 잉크를 이용한 다이오드, 자성물질, 트랜지스터까지 인쇄한 전자 회로들이 보고된 바 있다. 더 나아가서 고주파 회로를 위한 도파관(Waveguide), 안테나, 필터 등도 인쇄 기술로 구현되었으며, 메모리, 디스플레이 까지도 인쇄 기술로 제작되는 수준에 이르렀다. 눈부신 인쇄 전자 기술의 발달로 인해서 기존의 실리콘 기반의 집적 회로로 구현하기 힘들었던 기능들을 인쇄 전자 기술이 보완하기 시작하였고, 최근에는 이 둘을 융합한 하이브리드 인쇄 전자 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

무선 통신 기기들의 중요한 성능 지표 가운데 가장 중요한 요소 중 하나는 바로 전력이다. 즉, 전력을 최대한 적게 소비하면서 원활하게 목표한 기능을 수행하는 통신 기기의 설계는 한정된 배터리 전력을 효율적으로 사용하는데 매우 중요한 요소이다. 최근에는 배터리의 도움 없



김 상 길
Qualcomm Inc., 샌디에고,
미국

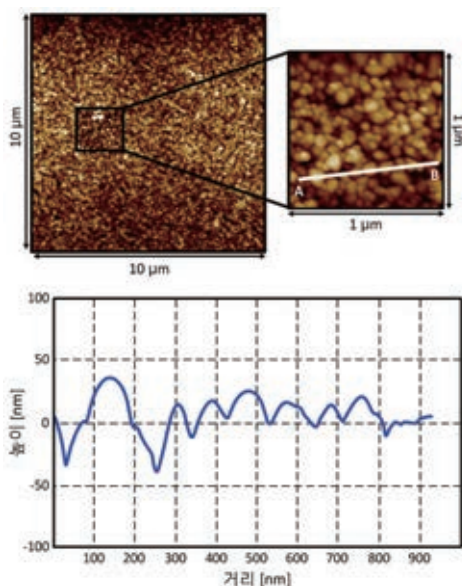
이 주변의 물리/화학/기계 에너지를 사용 가능한 전기 에너지로 전환하는 에너지 수확 기술이 학계에서 큰 주목을 받고 있다. 그 중에서도 한번에 여러 기기들에게 동시에 전력을 공급할 수 있고, 여러 장애물을 넘어서 가시거리 밖에서도 전력을 공급해 줄 수 있는 무선 전력 수확 기술이 저전력 통신/센서 플랫폼에 적절한 기술로서 주목받고 있다. 요컨대, 하이브리드 인쇄 전자 기술과 무선 전력 수확 기술의 융합을 통해서, 미래사회의 기반시설로서 사용될 반영구적 차세대 통신/센서 플랫폼의 실현에 한걸음 더 다가갈 수 있을 것이다.

II. 고주파 인쇄 회로

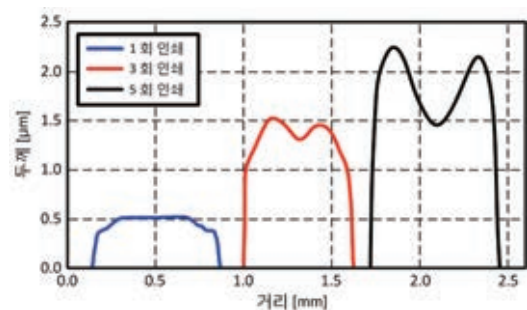
고주파 대역(MHz ~ GHz)에서 동작하는 안테나와 필터같은 고주파 회로 및 소자를 인쇄하는데 있어서 필수적인 기술은 전도층(Conductive layer)을 원하는 물질(Substrate)에 원하는 형태로 구현하는 것이다. 인쇄회로의 장점인 유연성(Flexibility)을 가지면서 잉크형태로 쉽게 구현할 수 있는 물질은 크게 두가지 종류가 있다. 중합체(Polymer)를 이용하는 방식과 나노입자를 이용하는 방식이 그것이다. 중합체를 이용한 전도성 잉크는 PEDOT:PSS를 주로 사용하고, 전기 전도성($\sigma = 20$

$\sim 2.1 \times 10^4$ S/m)은 비교적 낮지만 투명하고 상당히 유연한 전도층을 구현할 수 있다. 이러한 장점때문에 모바일 디스플레이, 정전기 방지 코팅등에 널리 사용된다. 나노입자를 이용한 방식은 주로 전도성이 높은 구리(Cu), 은(Ag), 금(Au) 등을 사용하며, 금속을 10 ~ 50 nm 크기의 나노입자로 만든 후 용매와 섞어 잉크로 만들어 사용한다. 나노입자를 인쇄하여 구현한 전도층은 인쇄 후 소결(Sintering)과정이 필요하고, 처리 방식과 잉크 구성에 따라 본래 물질의 대략 1/10 정도의 전기 전도성($\sigma = 10^6 \sim 10^7$ S/m)을 가진다. 나노입자를 이용한 전도층은 비교적 우수한 유연성을 가지며, 높은 전기전도성 때문에 전자기 차폐, 안테나 인쇄 등의 목적으로 산업 현장과 학계에서 널리 사용되고 있다.

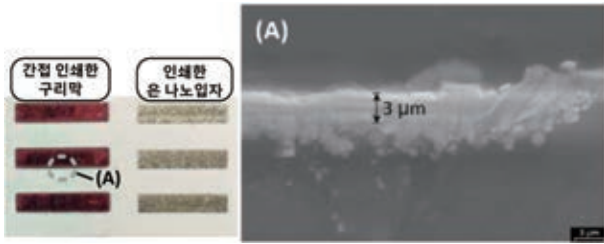
수많은 나노입자들 중에서 은나노 입자(Silver Nanoparticle)를 이용한 잉크는 높은 전기전도성과 비교적 낮은 소결 온도(100 ~ 200 °C)로 인하여 고주파 회로 설계에 가장 널리 사용되고 있다. <그림 1>은 잉크젯 인쇄기를 통해 인쇄된 후 열처리 소결과정을 마친 은나노 입자를 보여주고 있으며, 이때 사용된 잉크 방울의 부피는 10pL이다. AFM(Atomic Force Microscope)를 통해 본 인쇄된 은나노 입자는 평균 약 10~20 nm의 표면 거칠기(Surface Roughness)를 가지고 있고, <그림 2>에 따르면 인쇄 횟수당 약 0.5 um씩 금속 두께가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이때 얻은 전기전도성은 약 1.2×10^7 S/m이며, 안테나, 센서, RFID, AMC (Artificial Magnetic Conductor) 등의 다양한 응용 고주파 기기들이 소개된 바 있다^[1]. 한걸음 더 나아가서 비전도성 중합체(예: Su-8, PVP, PMMA, 등)와 반도체성 중합체(예: Pentacene,



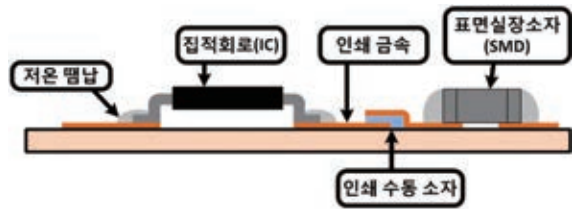
<그림 1> AFM으로 본 인쇄된 은나노 전도막 표면



<그림 2> 인쇄 횟수에 따른 은나노 전도막 두께



〈그림 3〉 염화 팔라듐 촉매제를 이용해 간접적으로 인쇄된 구리막

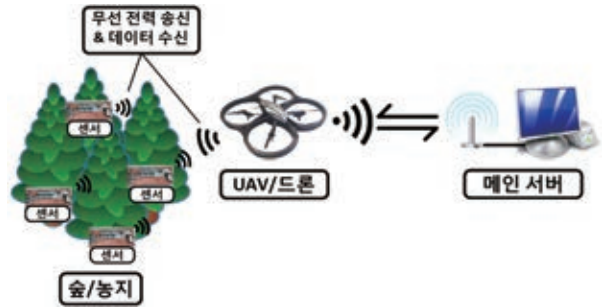


〈그림 4〉 하이브리드 인쇄 전자 기술

ITO 등)를 이용하면 더욱 진보된 인쇄 회로를 꾸밀 수 있고, 다층구조를 구현하기 위한 Via도 인쇄기술로 구현할 수 있다^[2]. 반면에 나노입자를 이용한 전도층이 본질적으로 가지고 있는 금속의 박막성, 납땀의 어려움 그리고 반도체성 중합체의 낮은 전자이동도 (Electron Mobility) 때문에 고주파 회로 설계와 집적도에 제한이 있다.

이러한 어려움을 극복하기 위해서, 간접 금속인쇄 기술이 개발되었다^[3]. 염화 팔라듐 (PdCl₂) 촉매제를 인쇄한 후에, 구리수용액을 이용해서 무전해 도금방식으로 구리막을 생성하였다. 금속 두께는 도금 시간에 비례해서 증가하며, 약 3×10⁶ S/m 의 전기 전도성으로 가진다. 〈그림 3〉은 인쇄된 은나노 입자와 염화 팔라듐 촉매 잉크를 이용해 50분간 구리 수용액에서 만들어진 구리막을 보여준다. 구리는 납땀이 쉽기 때문에 표면실장 기술 (Surface Mounting Technology)을 이용하여 실리콘 기반의 집적회로와 인쇄 회로 기판부터 인쇄 고주파 수동소자들(Printed Microwave Passive Components)을 통합한 하이브리드 인쇄 전자 기술 (Hybrid Printed Electronics)로 발전했다^[4].

〈그림 4〉는 하이브리드 인쇄 전자 기술의 개념을 간략하게 소개하고 있다. 이는 최첨단 실리콘 기술에 기반한 마이크로컨트롤러, ADC, 트랜지스터 등의 고성능·고집적도의 집적회로(IC)와 넓은 면적에 손쉽게 유연성 높은 회로를 구현할 수 있는 인쇄 전자 기술(안테나, 인덕터,



〈그림 5〉 고주파 무선 전력 수확기의 응용 예

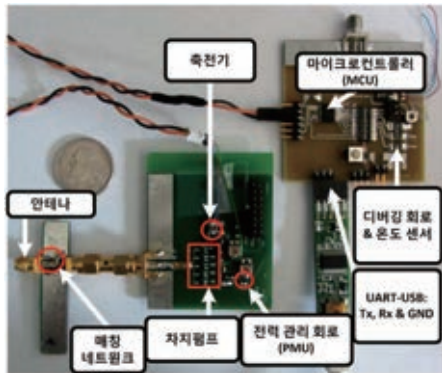


〈그림 6〉 에너지 수확기의 기본 구조

축전기, 센서 등)의 장점을 통합하고, 각 기술의 단점을 보완하는 기술이다^[5]. 스마트 스킨과 같은 LAE (Large Area Electronics)에 많이 응용되고 있으며, 사물인터넷 (IoT) 구현에 필수적인 센서/통신 플랫폼으로서 그 가능성을 시사했다^[6]. 또한 기존의 인쇄 회로기판(PCB) 기술보다 더욱 낮은 생산 비용과 짧은 제작 시간을 가지며, 잘 갖춰진 기존의 생산 인프라 구조와 호환이 용이하기 때문에 대량으로 전개되는 센서/통신 노드(Node)의 구현에 적절한 기술이다.

III. 고주파 (RF) 무선 전력 수확 기술

고주파 무선 전력 수확 기술은 무선 전력 전송의 한 방식으로서 근·중거리에서 일어나는 커플링이나 자기공명(Magnetic Resonance) 방식과는 다르게 원시야(Far Field)에서 전자기장의 에너지를 수확하는 기술이다. 〈그림 5〉와 같이 원거리에서 특정 공간의 전자기장 전력 밀도(mW/cm²)를 조절하여, 한번에 여러 통신/센서 기기들에게 전력을 공급할 수 있다. 그러므로 전개되어 있는 저전력 사물인터넷 기기들을 필요에 따라 구동시키거나 (On-Demand 방식), 배터리와 같은 주동력원을 충전/보조하고 다른 에너지원(열, 진동, 태양광 등)과 융합하여



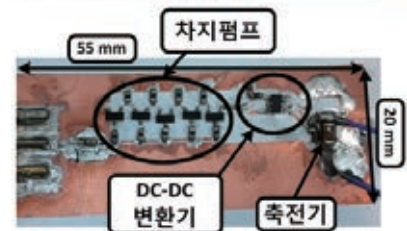
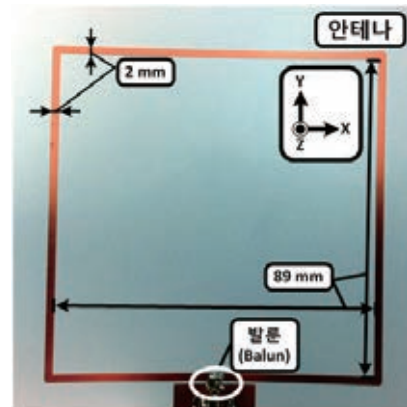
〈그림 7〉 차지펌프를 이용한 무선 전력 수확기 및 센서/통신 플랫폼

시스템을 가동하는 방식으로 응용될 수 있기에 사물인터넷 및 차세대 통신 시스템 구현의 핵심 기술이라 말할 수 있다.

〈그림 6〉은 기본적인 에너지 수확기의 구조를 나타내고 있다. 에너지 수확기는 태양광, 열, 진동, 전자기 에너지처럼 주위에 산재해 있는 기계·물리 에너지를 사용 가능한 직류 전기 에너지로 전환하여 배터리나 고용량 축전기(Capacitor)에 저장하고, 이를 효율적으로 관리하여 센서/통신 기기에 전력을 공급하는 역할을 한다. 원활한 전력 수급을 위해서 여러 에너지원을 통합하여 사용하는 기술도 활발히 연구되고 있다^[7].

안테나를 통해 방출된 전자기 에너지를 수확하는 기술에 대한 연구는 많은 관심을 끌었으며, 그 중에서도 주변에서 쉽게 찾을 수 있는 RFID, TV 그리고 무선통신 주파수 대역의 에너지 수확기술에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 862 ~ 928 MHz 주파수 대역을 통해 싱글톤(Single Tone)의 신호를 사용하는 RFID기술은 약 4 ~ 5m의 중거리에서 높은 효율을 보였으며, 비교적 높은 전력 밀도에서 작동하는 에너지 수확기가 보고되었다^{[8],[9]}. 모바일 무선통신용 주파수 대역(GSM, 3G, WiFi 등)과 디지털 TV주파수 대역에서 무선전력을 수확하는 기술은 에너지원과 먼 거리(약 6 km)에서 작동하지만, 상대적으로 낮은 전력밀도와 다중 주파수 대역의 전력을 수신할 수 있는 정류회로와 고이득(High Gain)안테나의 설계가 핵심이다^{[7],[10]}.

〈그림 7〉은 UHF 주파수 대역의 디지털TV 신호(512 MHz ~ 566 MHz)를 수신하여 마이크로컨트롤러를 배



〈그림 8〉 하이브리드 인쇄기술로 구현된 무선 전력 수확기



〈그림 9〉 하이브리드 인쇄 전자 기기의 유연성 실험

터리 없이 주기적으로 동작 시키도록 설계된 센서/통신용 플랫폼이다^[7]. 소형화된 광대역 야기-우다(Yagi-Uda Antenna)를 이용하여 수집된 전자기 에너지는 차지 펌프(Charge Pump)회로를 통해서 정류되고 전압이 1.8 V 이상으로 증폭된다. 반파(Half-wave) 혹은 전파(Full-wave) 정류회로는 교류-직류 에너지 전환에는 효율적이거나, 주변 전자기 전력 밀도가 낮은 경우에는 센서/통신 플랫폼에 필요한 1.8V이상의 전압을 생성하기가 어렵다. 또한 저전력 마이크로프로세서의 경우, 디지털 회로의 동



작을 위해서 1.8 V 혹은 0.9 V의 고정된 전압과 낮은 전류 ($\mu\text{A}\sim\text{nA}$ 단위)를 요구하기 때문에 차지 펌프 회로를 통해 원하는 정류·승압 효과를 얻을 수 있다.

이를 바탕으로, 하이브리드 인쇄 전자 기술을 이용한 RFID 주파수 대역(900 MHz) 무선 전력 수확기가 보고되었다^[4]. <그림 8>은 하이브리드 인쇄기술로 구현된 무선 전력 수확기를 보여주고 있다. 루프 (Loop) 안테나를 통해 얻어진 RFID대역의 전자기 에너지는 차지펌프 회로를 통해서 정류·승압 과정을 거친 후, 직류-직류 변압 회로(DC-DC Converter)를 통해 최종적으로 3.0 V로 변환되어 통신/센서 회로에 공급된다. 차지펌프 회로에서 0.9 V 이상의 출력 전압을 직류-직류 변압회로에 공급한다면, 이는 곧 안정적으로 3.0 V로 전환된다. 이때, 부하 저항 (Load)으로 4.72 k Ω 이 연결된다면, 전자기-직류 에너지 전환 효율은 약 17%가량 된다. 부하 저항 4.72 k Ω 은 0.9V환경에서 200 μA 를 소모하는 저전력 마이크로 컨트롤러를 등가저항으로 모형화(Modeling)한 값이다.

<그림 9>는 하이브리드 인쇄 전자기술의 물리적 유연성을 보여주고 있다. 반지름이 4 cm인 원통위에 가로/세로 방향으로 부착한 후, 회로의 전기적 성능의 변화를 측정했다. 안테나만이 물리적 외형 변화에 따라 동작 주파수 대역 (Bandwidth, BW)이 변하였지만, 정류·승압 회로의 성능에는 변화가 없었다. 하이브리드 인쇄 전자 기기의 유연성은 집적회로와 표면실장 소자(축전기, 다이오드)에 의해 제한을 받지만, 이들을 이어주는 전도층(구리)과 기판 물질(Substrate)의 물리/기계적 특성 덕분에 고성능을 유지하면서도 유연한 통신/센서 플랫폼을 구현할 수 있었다.

IV. 전망과결론

인쇄 전자 기술은 기존의 실리콘 기반의 고성능·고집적 기술과 융합하여 서로의 단점을 보완하는 방향으로 발전해 나아가는 중이다. 특히나 넓은 면적에 손쉽게 통신/센서 회로를 인쇄할 수 있기에 로봇/기계공학과 결합하여 인공 피부 및 스마트 스킨(Smart Skin)기술 연구에 큰 축을 담당하고 있다. 기존의 고밀도 집적회로는 스마

트 스킨에서 발생한 아날로그/디지털 신호들을 취합하여 빠르고 정확하게 분석함으로써 각 기술의 장점과 단점을 상호 보완하는 하이브리드 인쇄 전자 기술로 이어졌다. 인쇄 전자 회로 특유의 유연성 덕분에 제한적인 공간에도 통신/센서 시스템을 구축할 수 있으며, 비용이 적게 들고 대량 인쇄가 쉽기 때문에 사물인터넷처럼 대규모 통신/센서 시스템을 요구하는 기술에 적합하다. 또한, 인쇄 전자 기술은 RFID기술을 바탕으로 하는 안테나 기반 센서 구현에 뛰어난 적합성을 보여준다. RFID 안테나는 이미 인쇄 기술을 이용해 제작되고 있고, 기존의 RFID 안테나에 인덕터 혹은 축전기를 이용한 센서를 추가적으로 인쇄하여 손쉽게 센서 시스템을 구현할 수 있으므로 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다.

차세대 통신/센서 플랫폼을 이용한 사물인터넷 시스템을 구축하는데 있어서 논의되는 쟁점들 중 상용화에 있어서 가장 큰 두가지 쟁점을 뽑으라면, 하나는 전력 공급이고 다른 하나는 생산 비용일 것이다. 많은 연구 결과들이 저전력·저비용 통신/센서 기술을 주제로 발표되었지만, 두가지 모두를 만족시키는 결과를 찾기는 어려웠다. 하지만 에너지 수확기술과 인쇄 전자를 융합하여 통신/센서 시스템을 구축한다면 반영구적으로 동작하면서도 비교적 낮은 비용으로도 구현이 가능할 것이다. 따라서 무선 전력만이 아니라 열, 진동, 태양 에너지와 같이 형태와 성격이 다른 에너지원에서 얻은 에너지를 효과적으로 통합하고 통신/센서 시스템에 안정적으로 전력을 공급해 주는 연구가 필요할 것이다. 또한, 전자기 전력 밀도가 낮은 지역에서도 무선 전력을 수확할 수 있도록 민감도 (Sensitivity)가 높은 정류 회로의 설계와 낮은 전력을 효과적으로 관리하는 전력 관리 알고리즘에 대한 연구가 필수적이다. 무선 전력을 보내는 송신부에서도 적은 전력으로도 수신 기기들에 효율적으로 전력을 전달하기 위한 파형 (Waveform)이나 송신 방식에 대한 논의도 좋은 연구 주제가 될 것이다.

참고문헌

- [1] S. Kim, B. Cook, T. Le, J. Cooper, H. Lee, V. Lakafosis, R. Vyas, R. Moro, M. Bozzi, A. Georgiadis, A. Collado and



M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed Antennas, Sensors and Circuits on Paper Substrate", IET Microwaves, Antennas, and Propagation, vol. 7, no. 10, Jul. 2013, pp. 858-868.

[2] S. Kim, A. Shamim, A. Georgiadis, H. Aubert and M. M. Tentzeris, "Fabrication of Fully Inkjet-printed Vias and SIW Structures on Thick Polymer Substrates", vol. 6, no. 3, Feb. 2016, pp. 486-496.

[3] B. Cook, Y. Fang, S. Kim, T. Le, W. B. Goodwin, K. H. Sandhage and M. M. Tentzeris, "Inkjet Catalyst Printing and Electroless copper Deposition for Low-cost Patterned Microwave Passive Devices on Paper", vol. 9, no. 5, Sep. 2013, pp. 669-676.

[4] S. Kim, J. Bito, S. Jeong, A. Georgiadis and M. M. Tentzeris, "A Flexible Hybrid Printed RF Energy Harvester Utilizing Catalyst-based Copper Printing Technologies for Far-field RF Energy Harvesting Applications", 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Phoenix, AZ, USA, May 2015.

[5] R. A. Street, T. N. Ng, D. E. Schwartz, G. L. Whiting, J. P. Lu, R. D. Bringans and J. Veres, "From Printed Transistors to Printed Smart Systems", Proceedings of IEEE, vol. 103, no. 4, May 2015, pp.607-618.

[6] A. C. Arias, J. D. MacKenzie, I. McCulloch, J. Rivnay and A. Salleo, "Materials and Applications for Large Area Electronics: Solution-Based Approaches", Chemical Reviews, vol. 110, no. 1, Jan. 2010, pp. 3-24.

[7] S. Kim, R. Vyas, J. Bito, K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, M. M. Tentzeris, "Ambient RF Energy-harvesting Technologies for Self-sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms", Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 11, Nov. 2014, pp.1649-1666.

[8] A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powladge, A. V. Marnishev and J. R. Smith, "Design of an RFID-based Battery-free Programmable Sensing Platform", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 11, Nov. 2008, pp. 2608-2615.

[9] D. D. Donno, L. Catarinucci and L. Tarricone, "An UHF RFID Energy-harvesting System Enhanced by a DC-DC Charge

Pump in Silicon-on-Insulator Technology", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 23, no. 6, Jun. 2013, pp. 315-317.

[10] R. Shigeta, T. Sasaki, D. M. Quan, Y. Kawahara, R. Vyas, M. M. Tentzeris, T. Asami, "Ambient RF Energy Harvesting Sensor Device With Capacitor-Leakage-Aware Duty Cycle Control", IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 8, May 2013, pp. 2973-2983.



김상길

- 2010년 8월 연세대학교 전자공학과 학사
- 2011년 12월
Georgia Institute of Technology, Electrical and Computer Engineering 석사
- 2014년 12월
Georgia Institute of Technology, Electrical and Computer Engineering 박사
- 2013년 1월~2013년 3월
KAUST (King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia) 방문 연구원
- 2013년 4월~2013년 5월
CTTC (Centre Tecnologic de Telecomunicacions de Catalunya, Barcelona, Spain) 방문 연구원
- 2013년 5월~2013년 6월 LAAS-CNRS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systemes, Toulouse, France) 방문 연구원
- 2015년 1월~현재
Qualcomm Technologies, Inc., Senior Engineer
- 2015년 8월
IET Microwaves, Antennas and Propagation Premium Award

<관심분야>

무선 에너지 수확기술, 인쇄 고주파 전자기기, 5G 초단파 위상배열 안테나, RF 모듈 설계