

전력전자용 금속증착 필름 커패시터 설계 및 신뢰성 평가

윤중락^{1,a}, 김영광¹, 이석원², 이현용³

¹ 삼화콘덴서공업(주) 연구소

² 호서대학교 시스템제어공학과

³ 명지대학교 전기공학과

The Design and Reliability Evaluation of Metallized Film Capacitor for Power Electronic Applications

Jung Rag Yoon^{1,a}, Young Kwang Kim¹, Serk Won Lee², and Heun-Young Lee³

¹ R&D Center of Samwha Capacitor Co.,LTD., Yongin 449-884, Korea

² Department of System Control Engineering, Hoseo University, Cheonan, 336-795, Korea

³ Department of Electrical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

(Received January 4, 2011; Revised February 7, 2011; Accepted March 17, 2011)

Abstract: This paper presents the design and reliability evaluation of metallized film capacitor for power electronics application. The rated voltage of development capacitor is DC 3300[V], the capacitance is 5 μ F and the ripple current capability is 130 A_{rms}. Film metallization and patterns are an important design factor that has been development enhance the electric and reliability properties of film capacitor for power electronics. In term of capacitor construction and metallized pattern is one of the parameters that can be modified to further improve the rating in the terms of maximum ripple current and lifetime. This capacitor can be used as snubber capacitor application such as power train inverter system.

Keywords: Metallized film capacitor, Ripple current, Reliability evaluation, Snubber capacitor

1. 서론

전력용 스마트 그리드시스템에 적용되는 신재생 에너지원으로써 태양전지, 풍력발전기 및 전기 자동차 등에서 대전력, 고효율, 고신뢰성의 전력변환용 전력전자 시스템의 요구가 급격히 증가되고 있다 [1,2]. 전력전자회로에서 커패시터의 대표적인 용도로는 인버터시스템 전압부스터 (voltage booster)회로 전압안정화를 위한 DC link 커패시터, IGBT (insulated gate bipolar transistor)와 같은 반도체 스위칭 소자

의 스위칭에 의한 전력 변환 시 발생하는 펄스형 리플전류 제거에 사용되는 filter용 커패시터가 있다. 또한, 인버터 회로에 사용되는 IGBT와 같은 전력용 반도체 소자는 고속 스위칭 소자이므로 on/off 시에 콜렉터의 전류 di/dt가 수십~수백 ns정도로 빠른 속도로 변화하고 배선에 기생 인덕턴스 성분이 존재하여 썬지 전압이 발생하게 되어 인버터 회로에 절연파괴를 유발할 수 있기 때문에 발생한 전압을 흡수할 수 있는 snubber 커패시터가 필요하다. 전력전자용 커패시터로 적용되는 대표적인 커패시터로는 전해 커패시터, 적층 세라믹 커패시터 및 필름 커패시터가 있으며 최근에는 인버터 시스템의 고압화, 장수명 및 고

a. Corresponding author: yoonjunrag@yahoo.co.kr

리플 (ripple)전류 특성을 가지면서도 환경 친화적 필름 커패시터의 요구가 급격히 증가되고 있다 [3]. 필름 커패시터는 전극 방식에 따라 박막 전극형 커패시터 (foil type electrode capacitor)와 금속증착 전극형 커패시터 (metallized type electrode capacitor)로 구분할 수 있으며 박막전극형 커패시터는 수 μm 두께의 Al 금속 박과 수 μm ~수십 μm 두께의 유전체를 이용하여 제작한다. 반면에 금속증착 전극형 커패시터는 유전체 표면에 Al, Zn 또는 Al-Zn 합금을 200~500 Å 두께로 증착시킨 자기회복 (self-healing) 특성을 가지는 금속 증착 필름을 적용하여 유전체에 절연파괴가 발생하면 절연파괴가 발생한 근방의 증착된 금속전극을 가열하여 증발하게 된다. 일반적으로 전력전자용 커패시터는 고주파 특성, 고리플 특성, 안정성 및 친환경성을 고려하여 유전체로는 폴리프로필렌, 폴리에틸렌 테레프탈레이트를 적용한 건식 커패시터를 적용하고 있다 [4]. 전력전자용 커패시터는 금속증착 기술, 필름 및 절연체 기술, 절연 설계 및 신뢰성 평가 기술의 중요성을 인식하고 이에 대한 지속적인 개발은 진행되어 오고 있으나 대부분 저압, 저전력용에 대한 연구 결과를 발표하였다 [5]. 본 논문에서는 최근 전기 자동차, 풍력 발전기, 전기철도용 대용량 인버터에 적용되는 건식 snubber용 커패시터를 개발하기 위하여 필요한 유전체 및 금속 전극의 선정 및 설계, 신뢰성 평가에 대하여 설명하고자 한다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 정격전압 3,300 V, 정격용량 5 μF , 정격전류 40 A, 허용리플전류 130 Arms, 예상수명 100,000시간 이상을 견딜 수 있는 제품을 설계, 제작, 신뢰성 평가를 위하여 유전체 필름은 폴리프로필렌을 적용하였다. 폴리프로필렌 필름 상에 증착된 금속 전극의 종류 및 형상에 따른 전기적 특성을 평가하여 금속 전극의 재질을 형상을 선정하였다. 커패시터의 설계 시 정격전압 특성을 만족하기 위하여 3개의 단위 소자를 직렬 연결하였다. 각각의 단위소자는 금속증착 필름의 유전체 두께 10 μm , 유전율 2.2, 필름 폭 37 mm, 금속증착의 두께는 300 Å, 비저항 6~9 Ω/cm^2 이다. 단위소자는 그림 1과 같은 다이아몬드 구조를 가지는 자기 회복 보완성 필름 전극 형상을 적용하였으며 소자 메탈라이징 시 전극면의 접촉을 증가시키기 위하여 wave-cut 형상을 가지는 필름을 적용하였다.

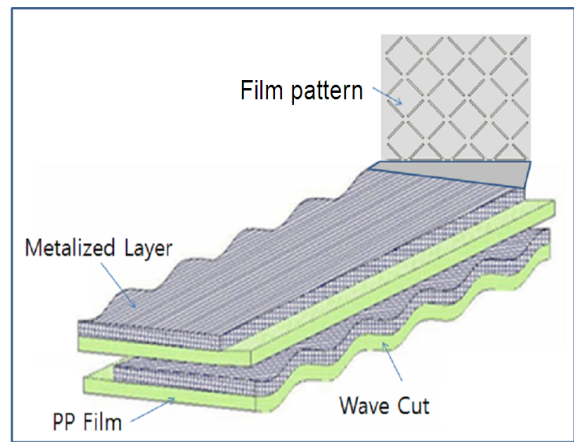


Fig. 1. Schematic of metallized PP film.

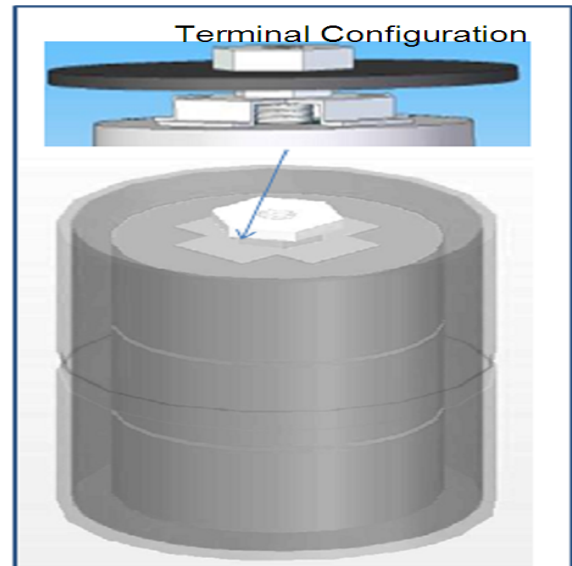


Fig. 2. Input and output terminal of film capacitor for power electronics.

단위 소자 설계는 식(1)을 적용 하였으며 소자의 내경 17 mm, 외경 84 mm이며 외부단자 인출을 위한 전극은 메탈 스프레이 (metal spray)방식을 적용 하였으며 체부도 및 공정 정수는 제조공정에 따른다.

$$C_e = \epsilon_e \epsilon_s \frac{bl}{d\lambda H}$$

C_e : 정전용량, ϵ_e : 진공중 유전율,
 ϵ_s : 유전체 유전율, l : 유전체 길이,
 λ : 정수, H : 체부도.

단위 소자를 3 직렬로 연결하여 그림 2와 같은 구조의 전력전자용 건식 커패시터를 제작하였으며 내부 절연은 에폭시를 적용하였다. 에폭시의 전기적 물성은 유전율 3.4, 내전압 20 kV/mm이며 경화조건은 1차 경화 80°C/2시간, 2차 경화 105°C/2 hr으로 하였다. 단위 소자 연결 및 외부 인출 단자는 ESR (equivalent series resistance), 정격전류, 주파수 특성을 고려하여 설계하였다. 전기적 특성은 임피던스 분석기 (HP4194, USA)를 이용하여 정전용량, 유전율 및 임피던스를 측정하였다. KS IEC 61,881 규격에 따라 내전압/충방전을 측정하였으며 신뢰성은 아레니우스 법칙을 적용한 수명 예측을 적용하였으며 가속계수는 전압, 온도로 하여 최종 시험결과 용량 변화율이 $\pm 3\%$ 이내로 하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 유전체 두께 10 μm 인 폴리프로필렌 필름 상에 증착된 금속 전극의 종류 및 형상에 따른 정전용량 및 손실의 변화를 나타내었다. DC 내전압 인가에 따른 정전용량 변화는 Al을 증착한 경우가 Zn 증착에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타내었으며 형상에 따른 영향은 세그먼트 전극에서 높은 내전압을 얻을 수 있었다. 이와 같은 결과는 아연 전극에 비하여 알루미늄 전극의 자기회복 특성이 우수하여 나타난 결과이며 동일한 알루미늄 전극에서도 세그먼트 전극에서 내전압이 높은 이유는 국부적인 결함이 발생한 세그먼트가 먼저 제거되어 나타난 결과이다. 유전손실의 경우는 정전용량의 변화와 유사한 특성을 보이고 있으며 아연 증착이 손실이 높은 것은 Al전극에 비해 비저항이 높아 나타난 결과로써 기존 보고와 동일한 결과이다 [6].

그림 4는 충방전 전압에 인가에 따른 정전용량 및 손실변화를 나타낸 그림으로서 시료에 1,300 V_{DC}에서 충전하기 시작하여 시험전압을 단계적으로 상승시키면서 급방전 진행하여 각 전압별로 100회 씩 인가 후 용량 및 유전손실을 측정하였다. 충방전 인가 전압에 따른 정전용량 및 유전손실 변화 경향은 그림 3의 DC 내전압 인가에 따른 영향과 동일하지만 충방전 시험의 경우에는 DC 내전압 인가 시 보다 대략 30% 정도 낮은 내전압을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 충방전 실험의 경우 충전하는 동안의 충전전류에 의한 커패시터의 발열, 방전 시 역전압에 의한 영향으로 DC 인가 시 보다 가혹한 조건임을 확인할 수 있었으며 금속전극에 의한 영향보다는 전극 형상에

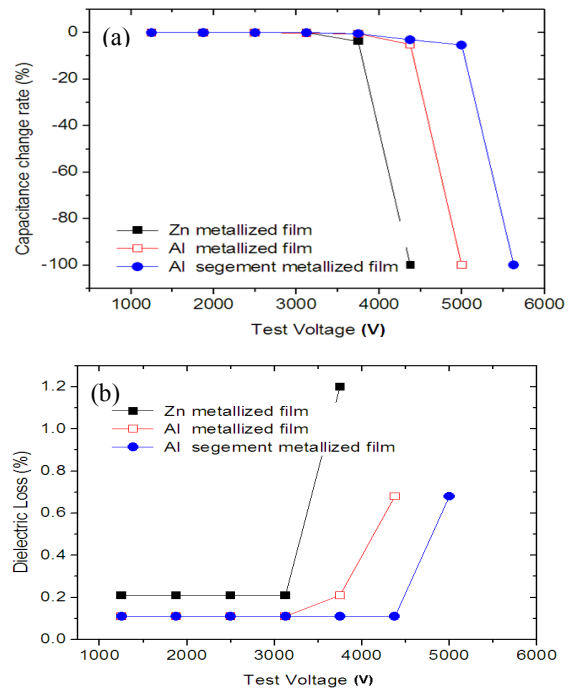


Fig. 3. Electrical properties of metallized electrode and pattern according to DC voltage, (a) capacitance change rate, (b) dielectric loss change rate.

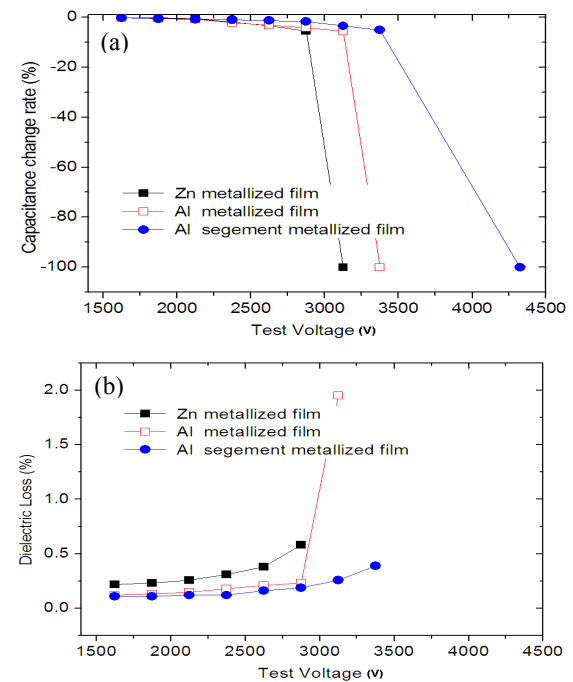


Fig. 4. Electrical properties of metallized electrode and pattern according to charge/discharge voltage, (a) capacitance change rate, (b) dielectric loss change rate.

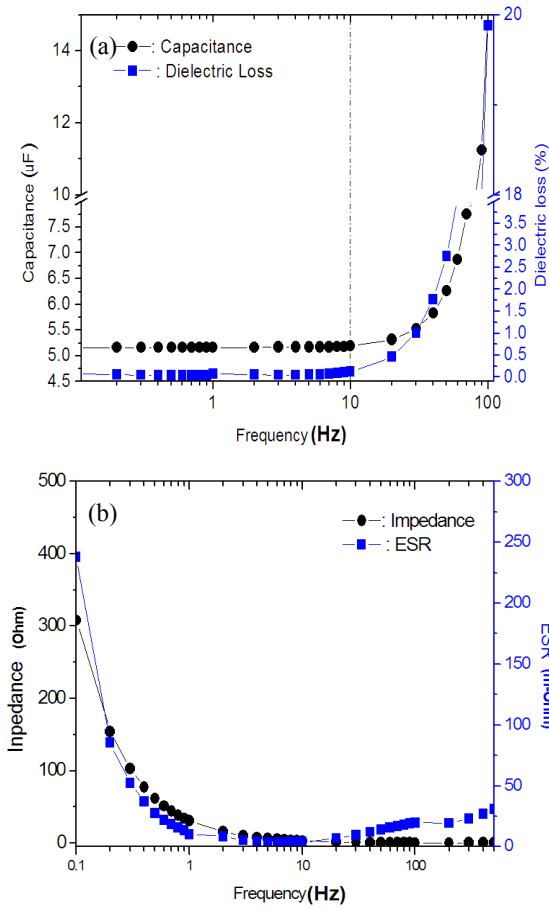


Fig. 5. Electrical properties of capacitor metallized according to frequency, (a) capacitance and dielectric loss, (b) Impedance and equivalent series resistance.

따른 영향이 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 방전 시 충전된 에너지가 국부적인 유전과피를 발생시키고 이에 따라 아크가 발생하여 전기적 특성을 열화 시키는 데 세그먼트 필름의 경우에는 절연과피가 발생하면 절연과피가 발생한 세그먼트 전극을 통해 전류가 흘러 발열이 발생하고 불량 세그먼트 전극의 진입부분을 끊어 절연과피를 고립시켜 나타난 결과이다.

그림 5는 정격전압 3,300 V, 정격용량 5 uF 제품의 주파수에 따른 정전용량, 유전 손실, 임피던스 및 등가 직렬저항 (equivalent series resistance)을 나타낸 그림이다. 제품은 Al 세그먼트 증착 전극으로 15 uF의 단위 소자를 제작하여 3개 직렬로 그림 2와 같이 구성한 제품이다. 제작된 제품의 정전용량 및 유전손실은 1 KHz 에서 5.2 uF, 0.12%의 특성을 보이고 있으며 정전

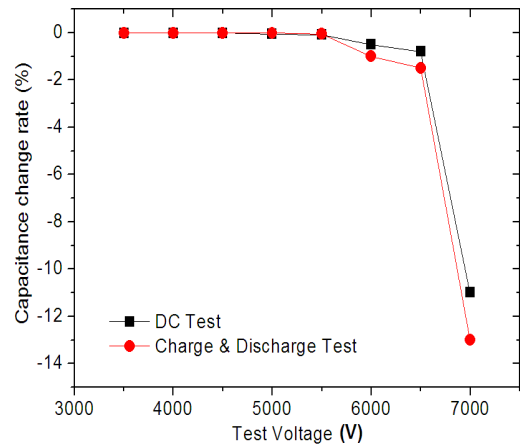


Fig. 6. Electrical properties capacitor according to charge/discharge and DC voltage.

용량이 설계치 보다 증가한 이유는 소자 간 절연을 위해 사용된 에폭시 유전율에 의한 영향으로 판단된다. 주파수에 따른 특성은 10 KHz부터 정전용량 및 손실이 증가하고 있으며 전력전자 커패시터에서 중요한 특성인자인 등가직렬저항이 1 KHz~10 KHz영역에서 0.1 mΩ이하로 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 등가직렬저항은 에너지 충방전 개념에서는 식 (2)를 따른다. 등가직렬저항의 대부분은 전극저항과 전극과 외부단자 접촉을 위한 메탈라이징 전극의 접촉 저항, 소자 간 접촉에 의한 저항의 합으로써 전극의 연면 마진 설계 및 메탈라이징 조건에 따라 커패시터의 특성이 좌우되며 에너지 저장 및 충방전 커패시터에서 중요한 특성이다.

$$ESR = \frac{\frac{1}{2}CV^2 - \int ivdt}{\int i^2 dt} \tag{2}$$

C : 정전용량, V : 충전전압,
 i : 방전 시 전류, v : 방전 시 전압

식 (3)은 주파수를 특성을 고려한 등가직렬저항으로 전력전자용 회로에서 발생하는 리플 전류에 의한 발열을 최소화하기 위해서는 고주파 영역에서 등가직렬저항을 최소화하여야 한다. 등가직렬저항은 전극저항과 전극과 외부단자 접촉을 위한 메탈라이징 전극의 접촉 저항, 소자 간 접촉에 의한 저항의 합과 주파수에 따른 정전용량, 주파수, 유전체 손실로 구성

되며 등가직렬저항이 작으면 리플 전류에 의한 발열이 낮아 신뢰성 및 내전압 특성이 우수한 전력전자용 커패시터가 가능하다 [7].

$$ESR = R_s + \frac{DF}{2\pi f C} \quad (3)$$

R_s : 전극 저항, DF : 유전 손실, f : 주파수

그림 6은 3,300 V, 정격용량 5 uF 제품의 DC 및 충방전 전압에 따른 정전용량의 변화율을 나타낸 그림으로 5,000 V까지는 정전용량 감소량이 없는 안정된 특성 나타내고 있다. 5,000 V~6,600 V까지는 정전용량 감소는 있지만 5% 이내의 특성을 보이고 있으며 제품의 규격인 정격전압 3,300 V는 충분히 견딜 수 있는 특성을 보여주고 있다.

그림 7은 3,300 V, 정격용량 5 uF 제품의 예상수명 100,000시간을 만족하기 위한 조건으로 실험한 가속시간에 따른 정전용량 변화율을 나타내었다. 커패시터의 가속 예상수명은 Propokowice와 Vaskas [7]의해 제안된 식 (4)의 P-V모델을 적용하였으며 필름 커패시터에서 일반적으로 적용되는 $n = 3.38$, $\theta = 9.36$ 으로 하여 수명 시간을 예측하였다 [8,9].

$$\frac{t_1}{t_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^n \cdot 2^{\frac{T_2 - T_1}{\theta}} \quad (4)$$

가속시험인자로는 온도 85°C, 가속전압은 정격전압의 1.36배로 하였으며 시험시간은 3,156시간 경과 후 초기 용량 대비 용량 변화율이 1.0%이내로 규정하였다. 그림 7의 실험 결과 500시간 까지 용량이 0.15% 증가 하였으며 이후에는 시간이 경과 할수록 용량이 감소하는 경향을 보였으나 0.5%미만의 안정된 특성을 보이고 있다.

그림 8은 전철용 인버터에 적용되는 리플전류가 130 A_{rms}인 인버터에 개발된 제품을 장착한 실증 시험 사진이다. 인버터회로에서 개발된 커패시터는 스너버 커패시터 기능을 하며 6개월 간 시험 운전한 결과 용량 변화율 -0.4%이며 상온에서 측정된 결과 표면온도 43°C를 나타내었으며 기준인 60°C에 비하여 현저히 낮은 온도를 나타내었다. 실증 평가와 수명 예측 실험 결과를 종합하면 수명 예측이 가능하였고 세그먼트를 가지는 Al 증착필름과 에폭시 구조로도 스너버 회로에서의 고 리플(ripple) 전류에도 적용 가능한 전력전자용 커패시터의 실현이 가능함을 확인할 수 있었다.

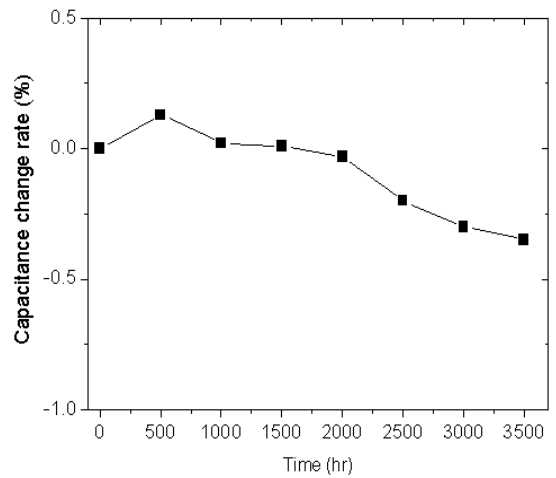


Fig. 7. Capacitance change rate according to accelerated condition of voltage and temperature.

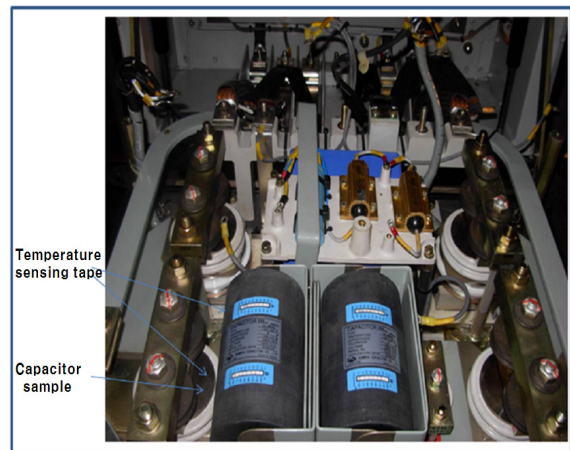


Fig. 8. Demonstrate test of inverter of power train.

4. 결론

전력전자용 건식 필름 커패시터 제작에 있어 증착 전극은 Zn에 비하여 Al 전극이 우수한 특성을 나타남을 확인할 수 있었다. 전극 형상의 경우 세그먼트 구조를 가지는 보완성 필름이 자기회복특성에 의하여 DC 및 충방전 내전압 특성에서 우수하게 나타났다. 실 제품을 제작하여 등가직렬 저항 및 주파수 특성을 측정된 결과 주파수 특성, ESR특성이 우수함을 확인할 수 있었으며 가속 수명 시험 조건을 만족하였다. 가속 수명 시험을 통하여 얻은 결과와 실제 장착하여 얻은 결과를 비교, 분석한 결과 필름 커패시터의 가속

계수 인자로 전압은 $n= 3.38$, 온도 변수 $\Theta= 9.36$ 으로 하는 것이 타당함을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] J. Arai, K. Iba, T. Funabashi, Y. Nakanishi, K. Koyanagi, and R. Yokoyama, *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, **8**, 52 (2008).
- [2] A. Emadi, Y. J. Lee, and Rajashekara, *IEEE Trans. Ind. Electron. Engineering*, **55**, 2237 (2008).
- [3] B. Y. Lee, I. K. Chong, W. Y. Lee, K. Y. Park, S. H. Lee, and Y. K. Kim, *Trans. KIEE*, **52**, 203 (2003).
- [4] D. Montanari, K. Saarinen, F. Scagliarini, D. Zeidler, M. Niskala, and C. Nender (CARTS Europe, 2008).
- [5] J. G. Kim, D. J. Lee, I. J. Kim, and Y. J. Park, *Trans. KIEE*, **59**, 1242 (2010).
- [6] Y. Yoshida, M. Nishimatsu, *IEEE Trns. Dielectr. Electy. Insul.*, **20** (1985).
- [7] T. I. Propokowice and A. R. Vaskas, *ECOM Report*, No. 90705-F (1969).
- [8] J. Zhao and F. Liu, *Microelectron. Reliab.*, **47**, 434 (2007).
- [9] J. R. Yoon, K. M. Lee, and S. W. Lee, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **10**, 5 (2009).