

## 에틸렌프로필렌 고무의 전압에 의한 누설전류 특성에 관한 연구

이성일<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 한국교통대학교 안전공학과

### A Study on Properties Leakage Current due to Voltage of Ethylene Propylene Rubber

Sung Ill Lee<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

(Received November 16, 2013; Accepted November 24, 2013)

**Abstract:** In this study, the leakage current - voltage characteristic and leakage current - time characteristic for the undegradated Ethylene Propylene Rubber and the Ethylene Propylene Rubber which is degraded by water tree for 200 hours have been measured on the temperature range of 50~80°C and applied DC voltage range of 200 V~800 V for 90 minutes. The results of this study are listed below. In case the temperature is 50°C, it founds that the leakage current have shown a increase in proportion to the applied voltage as 2 pA in 200 V, 6 pA in 400 V, 10 pA in 600 V and 15 pA in 800 V. It founds that the leakage current increased with the rise of temperature. It founds that the leakage current was consistent as time goes by, the leakage current of the sample degraded by water tree for 200 hours has increased more than undegradated sample.

**Keywords:** Leakage current, Ethylene propylene rubber

#### 1. 서 론

원자력 발전소의 원자로 격납용기 내에 설치되어 있는 전선이나 케이블은 방사선에 노출되어 있으므로 세월과 더불어 점점 절연 특성이 열화해 간다. 이들 전선이나 케이블은 냉각재 상실과 같은 사고가 일어났을 때에도 절연파괴의 현상이 일어나지 않고 정상적으로 동작하는 높은 신뢰성이 요구된다 [1-3].

이에 대응하여 전선이나 케이블 재료의 절연파괴를

방지하기 위해 기계적 강도는 충분히 고려하여 만들고 있으나 전기적 특성은 해결해야 할 문제점이 많다. 또한 절연의 종류나 상태에 따라서 전기적 특성이 크게 영향을 받으므로 비파괴 검사로 조사하는 것이 대단히 중요하다 [4-6].

이 연구에서는 절연파괴 사고를 미연에 방지하기 위해 시료로 선택한 에틸렌프로필렌 고무는 에틸렌과 프로필렌의 비율이 8대 2의 공중합체이며, 내후성, 내열성, 내오존성, 전기특성이 우수하여 전선의 절연에 사용되고 있다 [7-9]. 절연열화 진단을 행하기 위해서 미 열화 시료와 200시간 동안 수 트리 열화시킨 에틸렌프로필렌 고무 (ethylene propylene rubber)에 직류 전압을 인가하여 누설전류를 측정하였다. 측정 환경은 온도를 50~80°C의 범위로 설정하고 전압을 200~

a. Corresponding author; [silee@ut.ac.kr](mailto:silee@ut.ac.kr)

800 V로, 2~100분 동안 인가하면서 누설되는 전류의 값을 측정하여 전류-전압 특성, 전류-시간 특성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료

이 실험에서는 에틸렌과 프로필렌이 8대 2인 공중합체인 EP 고무 100 phr에 충전제인 하드 클레이(Hard clay)를 40 phr 배합하여 두께 250  $\mu\text{m}$ 인 시료를 제작하였다. 이 EPR 필름에 샌드페이퍼(sand paper: #1000)로 고압측 표면에 흠집을 낸 후 수 전극(water electrode)을 사용하여 교류전압 2 kV를 200시간 인가하여 열화시켰다. 온도를 50~80 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, 각 온도마다 직류전압을 200~800 V 범위에서 미열화 및 열화 시료에 인가하여 누설전류를 측정하였다. 또 같은 조건에서 2~100분 동안 누설전류를 측정하여 그 특성을 검토하였다.

### 2.2 측정 장치 및 회로

EP 고무의 누설전류-전압 특성을 측정하기 위해서 직류전원장치 (Japan, Kawaguchi Electrical Works, V-703), 일렉트로미터 (Japan, Takeda Riken, TR8651), 기록계 (Japan, Yokogawa, LR4110) 및 오븐 (Japan, Ando, To-9B)을 사용하였으며 그림 1에 블록선도를 나타내었다.

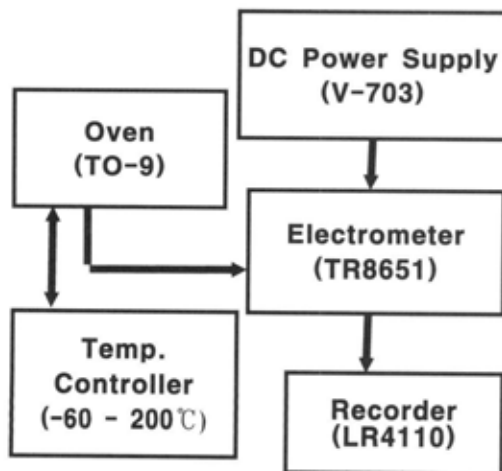


Fig. 1. Block diagram of V-I measuring device.

## 3. 결과 및 고찰

원자력 발전소의 원자로 격납용기 내에 설치되어 있는 전선이나 케이블은 방사선에 노출되어 세월과 더불어 점점 절연 특성이 수 트리 열화해서 절연과피에 이르게 된다.

이 연구에서는, 에틸렌 프로필렌 고무의 절연과피 상태를 직류 시험법으로, 임의로 설정한 각 온도에 있어서 전압에 의한 누설전류의 변화와 시간 경과에 의한 누설전류의 변화를 0시간과 200시간 동안 열화된 시료를 측정하여 그 특성을 검토한 결과이다.

### 3.1 누설전류-전압 특성

그림 2와 그림 3은 에틸렌 프로필렌 고무 시료에 지름 38 mm의 알루미늄 포일을 부착하여 직류시험회로를 이용한 장치에 시료를 장착하고 직류전압을 인가했을 때의 측정된 결과이다.

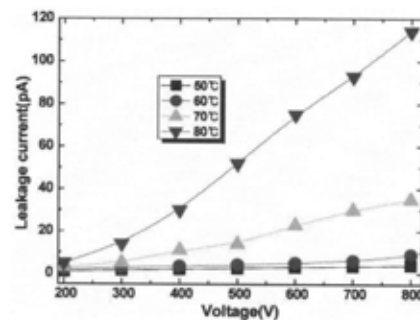


Fig. 2. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 0 hours.

그림 2는 0시간 (미열화) 열화된 에틸렌 프로필렌 고무 시료의 온도가 50~80 $^{\circ}\text{C}$ 에서 200 V~800 V를 인가했을 때의 누설전류를 측정된 결과이다. 50 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 200 V~800 V를 인가했을 때의 에틸렌 프로필렌 고무 시료의 누설전류를 측정된 결과는 200 V일 때 약 1 pA 정도, 400 V일 때 약 2 pA 정도, 600 V일 때 약 3 pA 정도, 800 V일 때 약 4 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 미소하게 누설전류도 증가했다. 60 $^{\circ}\text{C}$ 일 때는 50 $^{\circ}\text{C}$ 일 때와 거의 같은 경향으로 200 V일 때 약 2 pA 정도, 800 V일 때 약 9 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 누설전류도 증가했다. 70 $^{\circ}\text{C}$ 일 때는

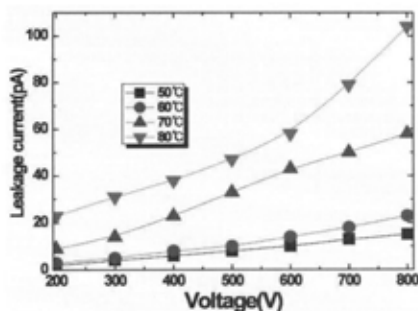


Fig. 3. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 200 hours.

200 V일 때 약 3 pA 정도, 400 V일 때 약 11 pA 정도, 600 V일 때 약 23 pA 정도, 800 V일 때 약 35 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 누설전류도 50°C, 60°C일 때 보다 증가했다. 80°C일 때는 200 V일 때 약 5 pA 정도, 400 V일 때 약 30 pA 정도, 600 V일 때 약 93 pA 정도, 800 V일 때 약 114 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 누설전류도 70°C일 때 보다 증가했음을 확인했다.

그림 3은 200시간 열화한 에틸렌 프로필렌 고무 시료의 온도가 50~80°C일 때의 200 V~800 V를 인가했을 때의 누설전류를 측정된 결과이다. 50°C에서 200 V~800 V를 인가했을 때의 에틸렌 프로필렌 고무 시료의 누설전류를 측정된 결과인데 200 V일 때 약 2 pA 정도, 400 V일 때 약 6 pA 정도, 600 V일 때 약 10 pA 정도, 800 V일 때 약 15 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 서서히 누설전류도 증가했다. 60°C일 때는 50°C일 때와 같이 200 V일 때 약 2 pA 정도로 큰 차이가 없지만 400 V일 때 약 8 pA 정도, 600 V일 때 약 14 pA 정도, 800 V일 때 약 23 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 누설전류도 50°C일 때 보다 증가했는데 이는 EP 고무 시료가 더 열화되었기 때문이라 생각된다. 70°C에서 200 V일 때 약 9 pA 정도, 600 V일 때 약 43 pA 정도, 800 V일 때 약 58 pA 정도로 전압의 증가에 비례하여 누설전류도 증가했다. 80°C에서 200 V일 때 약 23 pA 정도, 600 V일 때 약 58 pA 정도까지는 60°C일 때와 같이 십여 pA의 차의 같은 형태로 증가하다가 800 V일 때 물성이 변화하여 더욱 열화가 진행되어 약 104 pA 정도로 증가했음을 확인했다.

그림 2와 그림 3에서 온도 50~80°C일 때 누설전

류는 200~600 V의 저전압에서는 전압에 비례하여 증가하지만 600 V 이상 800 V에서는 온도가 높아질수록 80°C에서만 급격히 증가하며 옴의 법칙보다 커져 있음을 확인했고, 그 외에서의 온도는 같은 경향을 보이고 있음을 확인했다. 600 V까지의 저전계 영역까지는 이온전도라 생각되고, 800 V 이상의 파괴에 가까운 고전계 영역에서는 전자전류가 흐른다고 생각된다.

### 3.2 누설전류-시간 특성

그림 4~6은 미열화한 에틸렌 프로필렌 고무 시료에 지름 38 mm의 알루미늄 포일을 부착하여 200 V~800 V를 파라미터로 하여 온도를 60~100°C로 설정한 상태에서 90분간의 누설전류를 측정된 결과이다.

그림 4는 설정 온도를 60°C로 했을 때의 200 V~800 V의 누설전류를 90분간 측정된 결과이다. 200 V의 경우 1분일 때 약 18 pA 정도, 10분일 때 약 2.2 pA 정도, 20분일 때 약 1pA 정도, 40분일 때 약 0.64 pA 정도로 감소한 후 90분일 때 약 0.49 pA 정도로 누설 전류값이 일정하게 되었다. 400 V, 600 V, 800 V의 경우도 모두 200 V의 경우와 같은 형태를 나타내고 있다. 800 V의 경우 1분일 때 약 95 pA 정도, 10분일 때 약 20 pA 정도, 20분일 때 약 12 pA 정도, 30분일 때 약 7 pA 정도로 감소한 후 90분일 때 약 7 pA 정도로 누설 전류값이 일정하게 되었다. 각 전압마다 50분 경과했을 때의 누설전류는 200 V일 때 약 0.49 pA 정도, 400 V일 때 약 1.68 pA 정도, 600 V일 때 약 2.6 pA 정도, 800 V일 때 약 6.8 pA 정도가 흘렀다.

그림 5는 설정 온도를 80°C로 했을 때 200 V~800 V에서 누설전류를 90분간 측정된 결과이다. 200 V의 경우 1분일 때 약 18 pA 정도, 10분일 때 약 14 pA 정도로 감소한 후 90분일 때 약 8.4 pA 정도로 누설 전류 값이 일정하게 되었다. 400 V, 600 V, 800 V의 경우도 모두 200 V의 경우와 같은 형태를 나타내고 있다. 800 V의 경우 1분일 때 약 360 pA 정도, 10분일 때 약 200 pA 정도, 20분일 때 약 160 pA 정도, 30분일 때 약 130 pA 정도로 감소한 후 90분일 때 약 129 pA 정도로 누설 전류값이 일정하게 되었다. 각 전압마다 50분 경과했을 때의 누설전류는 200 V일 때 약 0.49 pA 정도, 400 V일 때 약 1.68 pA 정도, 600 V일 때 약 2.6 pA 정도, 800 V일 때 약 6.8

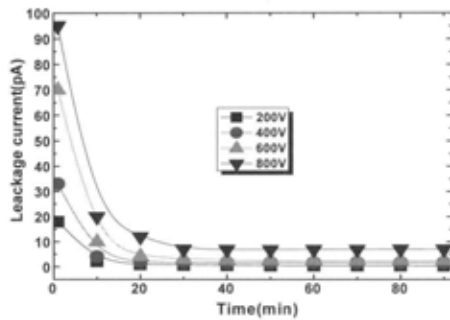


Fig. 4. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 0 hours, 60°C.

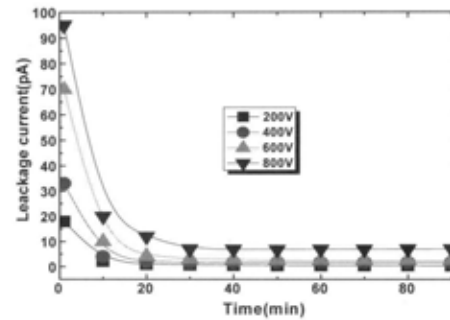


Fig. 6. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 0 hours, 100°C.

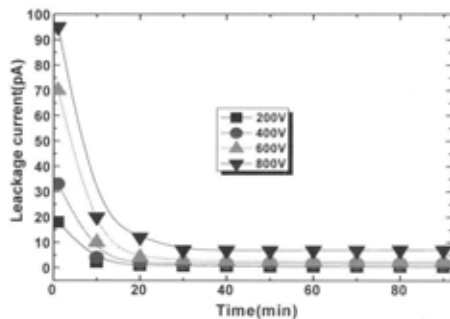


Fig. 5. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 0 hour, 80°C.

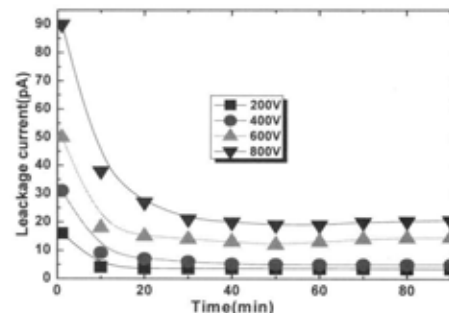


Fig. 7. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 200 hours, 60°C.

pA 정도가 흘렀다.

그림 6은 설정 온도를 100°C로 했을 때 200 V~800 V에서 누설전류를 90분간 측정한 결과이다. 200 V의 경우 1분일 때 약 79 정도, 10분일 때 약 28 정도로 감소한 후 90분일 때 6.2 pA 정도로 누설전류값이 일정하게 되었다. 400 V, 600 V, 800 V의 경우도 모두 200 V의 경우와 같은 형태를 나타내고 있다. 800 V의 경우 1분일 때 약 980 pA 정도, 10분일 때 약 420 pA 정도, 20분일 때 약 320 pA 정도, 90분일 때 약 318 pA 정도로 누설 전류값이 일정하게 되었다. 각 전압마다 50분 경과했을 때의 누설전류는 200 V일 때 약 6.6 pA 정도, 400 V일 때 약 33.6 pA 정도, 600 V일 때 약 133.8 pA 정도, 800 V일 때 약 318 pA 정도가 흘렀다.

그림 4~6에서 설정 온도가 높아질수록 누설전류가 더 증가됨을 알 수 있었다. 또한 과산화물을 가열하여 발생한 산소가 인접한 폴리에틸렌 분자로부터 한 개씩 분자를 뽑아내어 물 분자를 만들면 뽑아내어 물

분자를 만들면 뽑아내어진 폴리에틸렌 분자는 화학 결합을 하게 된다. 가교폴리에틸렌은 가교를 일으킴으로 망상의 구조로 되어 연화점이 현저하게 증가한 것이다.

그림 7~9는 2 kV에서 200시간 열화한 에틸렌 프로필렌 고무 시료에 지름 38 mm의 알루미늄 포일을 부착하여 200 V~800 V를 파라미터로 하여 온도를 60~100°C로 설정한 상태에서 90분간의 누설전류를 측정한 결과이다.

그림 7은 설정 온도를 60°C로 했을 때의 200 V~800V의 누설전류를 90분간 측정한 결과이다. 200 V의 경우 1분일 때 약 16pA 정도, 10분일 때 약 4.1 pA 정도, 20분일 때 약 3.6pA 정도로 감소한 후 90분일 때 약 3.46 pA 정도로 누설 전류값이 일정하게 되었다. 400 V, 600 V, 800 V의 경우도 모두 200 V의 경우와 같은 형태를 나타내고 있다. 800 V의 경우 1분일 때 약 90 pA 정도, 10분일 때 약 38 pA 정도, 30분일 때 약 21 pA 정도, 50분일 때 약 19 pA 정도

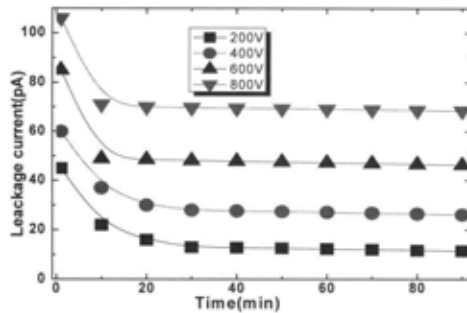


Fig. 8. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 200 hours, 80°C.

로 감소한 후 서서히 증가하여 90분일 때 약 20.6 pA 정도로 누설전류 값이 흘렀다. 각 전압마다 50분 경과했을 때의 누설전류는 200 V일 때 약 3.5 pA 정도, 400 V일 때 약 5 pA 정도, 600 V일 때 약 12 pA 정도, 800 V일 때 약 19 pA 정도가 흘렀다.

그림 8은 설정 온도를 80°C로 했을 때의 200 V~800 V의 누설전류를 90분간 측정된 결과이다. 1분일 때 200 V일 때 약 45 pA 정도, 400 V일 때 약 60 pA 정도, 600 V일 때 약 85 pA 정도, 800 V일 때 약 106 pA 정도를 나타낸 이후 감소하여 50분 경과했을 때의 누설전류는 200 V일 때 약 12.6 pA 정도, 400 V일 때 약 27.4 pA 정도, 600 V일 때 약 47.6 pA 정도, 800 V일 때 약 69.3 pA 정도가 흘렀다. 400 V, 600 V, 800 V의 경우도 모두 200 V의 경우와 같은 형태를 나타내고 있다. 800 V의 경우 1분일 때 약 106 pA 정도, 10분일 때 약 71 pA 정도로 감소한 후 90분일 때 약 68.5 pA 정도로 누설전류 값이 일정하게 되었다.

그림 9는 설정 온도를 100°C로 했을 때의 200 V~800 V의 누설전류를 90분간 측정된 결과이다. 200 V의 경우 1분일 때 약 98 pA 정도, 10분일 때 약 37 pA 정도, 20분일 때 약 28 pA 정도로 감소한 후 90분일 때 21.6 pA 정도로 누설전류 값이 일정하게 되었다. 400 V, 600 V, 800 V의 경우도 모두 200 V의 경우와 같은 형태를 나타내고 있다. 800 V의 경우 1분일 때 약 520 pA 정도, 10분일 때 약 130 pA 정도, 20분일 때 약 100 pA 정도로 감소한 이후 90분일 때 약 93.5 pA 정도로 누설 전류값이 일정하게 되었다. 각 전압마다 50분 경과했을 때의 누설전류는 200 V일 때 약 22.6 pA 정도, 400 V일 때 약 21 pA 정도,

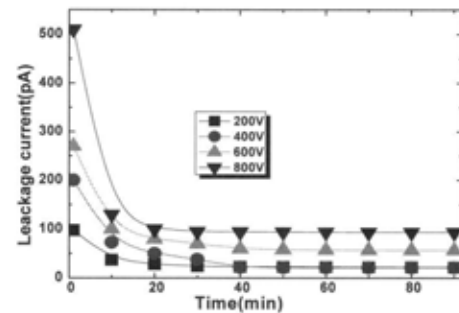


Fig. 9. Voltage dependence of leakage current in EPR specimen degraded 200 hours, 100°C.

600 V일 때 약 58 pA 정도, 800 V일 때 약 94.2 pA 정도가 흘렀다.

그림 7~9에서 설정온도가 높아질수록 누설전류가 더 증가됨을 확인했다. 또한 양 전극 사이에 직류전압을 인가했을 때 시간의 경과와 더불어 누설전류는 감소하다가 어느 시간을 경과 한 후에는 일정하게 된다. 여기서 충전전류  $I_c(t) = I_d(t) + I_a(t) + I$ 로 되며, 이때  $I_d(t)$ 는 변위전류,  $I_a(t)$ 는 흡수전류,  $I$ 는 누설전류이고  $I_d(t)$ 는 한 순간에 감쇠하는 전류이므로 무시할 수 있다. 따라서  $I_c(t) = I_a(t) + I$ 로 된다. 그러므로 그림 4~6에서 0시간 동안 열화시킨 시료를 측정하였을 때 시간의 경과와 더불어 흡수전류  $I_a(t)$ 가 감소한 결과 충전전류  $I_c(t)$ 는 횡축과 평행하게 되어 누설전류  $I$ 만큼 남았다.

그림 7~9에서는 EP 고무시료를 2 kV에서 200시간 동안 수트리 열화시켰기 때문에 누설전류는 미열화 시료보다 증가했음을 확인했다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 미 열화 시료와 200시간 동안 수 트리 열화시킨 에틸렌프로필렌 고무 (ethylene propylene rubber)에 50~80°C의 설정 온도에서 90분간 200~800 V의 직류전압을 인가하여 누설전류-전압 특성, 누설전류-시간 특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설정 온도가 50°C일 때 EP 고무 시료에 인가한 직류전압이 200 V일 때 약 2 pA 정도, 400 V일 때 약 6 pA 정도, 600 V일 때 약 10 pA 정도, 800 V일 때 약 15 pA 정도로, 전압의 증가에 비례하여

- 서서히 누설전류도 증가했음을 확인했다.
2. 누설전류는 설정 온도가 높아질수록 커짐을 확인했다.
  3. 누설전류는 시간의 경과와 더불어 일정하게 되었으며, 200시간 수트리 열화시킨 시료가 미열화 시료보다 증가했음을 확인했다.

## REFERENCES

- [1] R. Sarathi, R. K. Sahu, and P. Rajeshkumar, *Mater. Sci. Eng.*, A445, 567 (2007).
- [2] N. Hayakawa, H. Maeda, S. Chigusa, and H. Okubo, *Cryogenics*, 40, 167 (2000).
- [3] G. Iyer, R. S. Gorur, R. Richert, A. Krivda, and L. E. Schmidt, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18, 659 (2011).
- [4] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, S. Kuge, M. Kozako, and T. Tanaka, *IEEJ Trans. FM*, 126, 1136 (2006).
- [5] R. J. Morgan, L. T. Mones, and W. J. Steele, *Polymer*, 23, 295 (1982).
- [6] J. J. Park, C. H. Lee, J. Y. Lee, and H. D. Kim, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 18, 667 (2011).
- [7] T. Imai, F. Sawa, T. Ozaki, T. Shimizu, R. Kido, M. Kozako, and T. Tanaka, *Proc. of International Symposium on Electrical Insulating Materials* (Kitakyushu, Japan, 2005) p. 239.
- [8] P. Gonon, A. Sylvestre, J. Teyseyre, and C. Prior, *J. Mater. Sci: Mater. in Electro.*, 12, 81 (2001).
- [9] G. Chen, J. Zhao, S. Li, and L. Zhong, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 222904 (2012).