

교번자속 인가에 의한 유기 반도체막의 어닐링 효과에 관한 연구

박재훈, 최종선, 이용수, 노재상, 김은석
 홍익대학교 전기정보제어과, 홍익대학교 금속재료 공학과**

Study on the annealing effects of organic semiconducting layer using alternating magnetic field

Jae Hoon Park, Jong Sun Choi, Yong Soo Lee, Jae Sang Ro, and Eun Seok Kim

* Dept. of Electrical, Information & Control Eng. Hongik University

** Dept. of Metallurgy & Material Science Hongik University

Abstract - A novel technique of alternating magnetic field (AMF) is investigated to improve the electrical conducting properties of pentacene. By applying AMF to pentacene layer, the electrical conductivity of pentacene was enhanced, which can be applied for characteristic improvements of pentacene-based thin-film transistors. In this study, the annealing effects of pentacene layer using AMF will be discussed.

소자의 전류-전압 특성은 Keithley 238 electrometer를 사용하여 측정하였다. 그리고 표면 특성 관찰을 위해 Atomic Force Microscopy(AFM)을 사용하였고, pentacene의 화학적 이동을 조사하기 위해 FT-IR (Fourier Transform-Infrared) 측정을 하였다.

1. 서 론

최근 10년간 유기 박막 트랜지스터(Organic Thin-film Transistors)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 소자 특성에 있어 괄목할 만한 발전이 이루어졌다[1-4]. 유기물을 사용하는 트랜지스터는 기존의 무기물 기반의 트랜지스터에 비해 저온 공정이 가능하며 생산 비용을 절감시킬 수 있고, 구부릴 수 있는 디스플레이에 구동 소자로서 적용할 수 있는 장점이 있다[5, 6]. 또한 스마트 카드, 전자 바 코드 및 저가의 메모리 소자 제작에 적용될 수 있다. 그러나 유기 박막 트랜지스터는 비정질 실리콘 트랜지스터 수준의 $1.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 낮은 전계 효과 이동도 특성을 나타내고 있어 소자의 광범위한 응용에 제한을 받는다[7].

현재 사용되는 유기 반도체 재료 중에서, pentacene이 가장 우수한 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 pentacene을 진공 열증착을 통해 성막한 후, 교번자속 인가에 의한 유도 가열로써 어닐링 시켜 pentacene 막에서의 전하전달 특성을 향상시키고자 하였다. 이를 통해 유기 박막 트랜지스터의 특성을 향상시킬 수 있으며, 향후 유기 박막 트랜지스터를 이용한 전 유기 디스플레이 소자 및 논리 회로 등 응용회로의 효율을 높일 수 있다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

교번자속 인가가 유기 반도체막에 미치는 영향을 조사하기 위해 그림 1(a)의 소자를 제작하였고, 유기 반도체로 그림 1(b)의 분자 구조를 갖는 pentacene을 사용하였다. 소자 제작을 위해서 초음파 세척된 유리 기판 위에 600 Å 두께의 pentacene 막을 형성하였다. Pentacene 막은 약 1.6×10^{-6} Torr 진공도에서 열증착을 통해 1.0 Å/s의 속도로 성막하였다. 그리고 그림 2의 교번자속 인가 장치에서 어닐링 처리하였다. 교번자속을 이용한 어닐링 처리는 13.56 kHz의 주파수를 갖는 전류를 인가하여 발생한 유도 가열로써 이루어진다. 본 실험에서는 인가 전류를 30, 40, 50 A로 달리하여 5분 동안 처리하였다. 끝으로 전극 형성을 위해 1500 Å 두께의 알루미늄(Al)을 1.6×10^{-6} Torr에서 열증착하여 성막하였다.

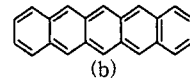
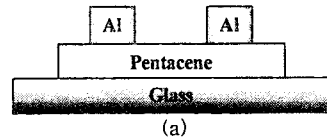


그림 1. (a) 제작된 소자 및 (b) pentacene 분자 구조.

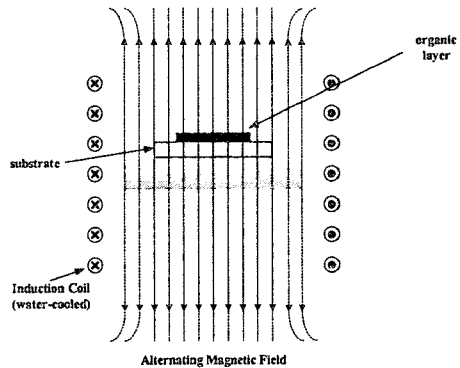


그림 2. 교번자속을 이용한 어닐링 시스템.

2.2 실험 결과

그림 3은 pentacene막의 교번자속을 이용한 어닐링 처리 조건에 따른 전류-전압 특성을 나타내며, 제작된 소자의 전기적 특성 평가를 위해 수식 (1)을 이용하여 전기 전도도를 계산하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 교번자속을 이용하여 pentacene 막을 어닐링 처리한 소자가 처리하지 않은 소자에 비해 전기적 특성에 향상이 있음을 알 수 있다. 그리고 교번자속을 이용하여 어닐링 처리한 소자의 경우, 50 A의 전류를 인가하였을 때 전기 전도도가 약 1.18×10^{-6} S/cm로서 특성이 가장 우수하였다. 처리 조건에 따른 소자 특성을 표 1에 정리하였다.

$$\sigma = \frac{L}{R \times S} \quad (1)$$

여기서 L 은 유기 박막의 두께이고, S 는 소자의 면적이다.

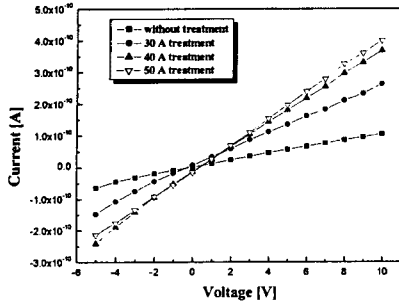


그림 3. 교번자속을 이용한 어닐링 처리에 따른 소자의 전류-전압 특성.

표 1. 교번자속을 이용한 어닐링 처리에 따른 소자의 전기적 특성.

	No treatment	30 A treatment	40 A treatment	50 A treatment
R [Ω]	8.82×10^{10}	3.65×10^{10}	2.46×10^{10}	2.43×10^{10}
σ [S/cm]	0.32×10^{-6}	0.78×10^{-6}	1.16×10^{-6}	1.18×10^{-6}
Temperature		$\approx 70^\circ\text{C}$	$\approx 80^\circ\text{C}$	$\approx 90^\circ\text{C}$

교번자속을 이용한 어닐링 처리는 인가 전류에 따라 표 1에 나타낸 바와 같이 pentacene막을 가열시킨다. 그러므로 본 연구에서는 교번자속 인가에 의한 어닐링 효과가 발생한 온도에 의한 것인지 확인하기 위해 진공 furnace에서 직접적으로 pentacene막에 열을 인가하는 어닐링을 실시하였다. 진공 furnace를 이용한 어닐링에 따른 소자의 전류-전압 특성을 그림 4와 표 1에 나타내었다. 그 결과 pentacene막에 직접적으로 열을 가하는 어닐링은 pentacene의 전기 전도 특성을 악화시키는 것을 알 수 있다.

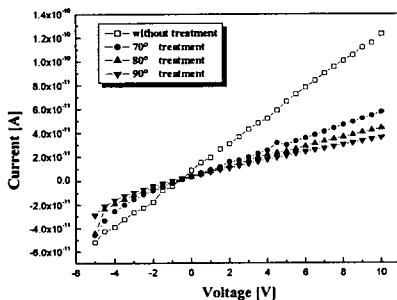


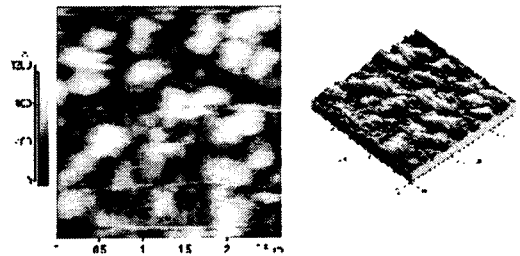
그림 4. 진공 furnace에서 어닐링 처리한 소자의 전류-전압 특성.

표 1. 진공 furnace에서 어닐링 처리한 소자의 전기적 특성.

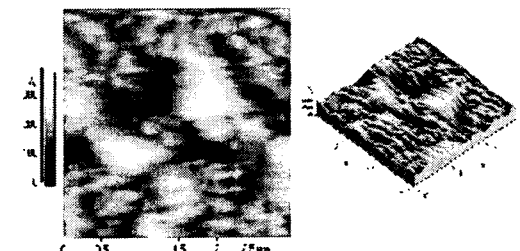
	No treatment	70 °C treatment	80 °C treatment	90 °C treatment
R [Ω]	8.82×10^{10}	2.06×10^{11}	2.50×10^{11}	3.11×10^{11}
σ [S/cm]	0.32×10^{-6}	0.11×10^{-6}	0.09×10^{-6}	0.07×10^{-6}

교번자속을 유기막에 인가하면 히스테리시스 손실 (hysteresis losses) 또는 회오리 전류 (eddy current)에 의해 유도 가열 효과가 발생한다. 히스테리시스 손실에 의한 유도 가열은 자성을 띤 물질에서만 일어나는 현상으로서 인가된 교번 자속에 의해 분자가 한 방향 또는 다른 방향으로 자화되면서 마찰을 일으켜 발생하는 결과이다. 이는 분자를 회전시키는데 필요한 에너지가 열로 변환되는 형태로서 발생한 열은 역전 주파수(reversal frequency)의 증가와 더불어 증가한다. 그리고 회오리 전류에 의한 유도 가열은 모든 전도성 물질에서 일어나는 현상으로 회오리 전류에 의한 I^2R 만큼의 전기적 에너지가 열에너지로 변한다. 이상의 유도 가열은 일반적인 어닐링에 사용되는 외부 가열원을 필요로 하지 않는다. 외부 가열원에 의한 어닐링의 경우 유기막의 국부적인 가열로 인해 온도 구배가 발생하며, 직접적인 접촉을 이룬 부분에서 유기막의 파괴가 발생할 수도 있다. 그러나 교번 자속을 이용한 유도 가열은 국부적인 유기막의 파괴를 막을 수 있으며, 유기막 내에서 온도 분포를 균일하게 하는 장점을 갖는다. 또한 외부 가열원을 목표치 온도도 상승시키고 냉각시키는데 소요되는 시간에 비해 빠른 속도로 상승 및 냉각시킬 수 있어 공정 시간을 단축시키고, 유기막의 열에 대한 불필요한 노출 시간을 줄일 수 있다. 따라서 교번자속을 이용한 pentacene막의 어닐링 처리가 진공 furnace를 이용한 어닐링 처리와 비교하여 소자의 전기적 특성 향상을 위해 효율적인 방법임을 알 수 있다.

교번자속을 이용한 어닐링이 pentacene막에 미치는 영향을 조사하기 위하여 AFM 이미지를 관찰하였다. 그림 5(a)는 어닐링 처리하기 전의 pentacene 이미지를 나타내며, 그림 5(b)는 처리 후의 pentacene 이미지를 나타낸다. 이를 통해 교번자속을 이용한 어닐링 처리를 통해 pentacene의 그레인 크기가 더 커지는 것을 확인하였다. 또한 어닐링 전·후 pentacene막 표면의 평균 거칠기는 각각 188, 54 Å으로 관찰되었다. 따라서 교번자속을 이용한 어닐링 처리를 통해 pentacene막의 재결정화가 일어나는 것을 알 수 있고, 이러한 구조적 변화가 전기 전도도 향상에 기여하였음을 예상할 수 있다.



(a) 어닐링 처리 전



(b) 어닐링 처리 후

그림 5. Pentacene막의 AFM 이미지.

또한 Pentacene막은 교번자속 인가에 의한 어닐링 처리 중에 자기장에 영향을 받는다. 벤젠 고리의 π -electron은 자기장의 영향으로 고리 전류(ring current)를 발생시킨다. 이러한 고리 전류는 또 다른 자기장을 형성하여 벤젠 내 수소 원자 운동에 차폐를 일으키게 된다. 이러한 일련의 현상을 그림 6(a)에 도시하였다. 수소 원자 운동의 차폐 현상은 그림 6(b)의 FT-IR 분석을 통해 파수 830~1280 cm^{-1} 에서 파형의 변화를 통해 확인할 수 있다. 그러나 교번자속에 의한 화학적 이동이 pentacene막에서의 전기 전도 특성에 미치는 영향에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다.

[참고 문헌]

- [1] S. Verlaak, V. Arkhipov, and P. Heremans, "Modeling of transport in polycrystalline organic semiconductor", Appl. Phys. Lett., Vol. 82, p. 745, 2003
- [2] M. H. Choo, Jae Hoon Kim, and Seongil Im, "Hole transport in amorphous-crystalline-mixed and amorphous pentacene thin-film transistors", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, p. 4640, 2002
- [3] H. Klauk, M. Halik, U. Zschiesch, G. Shumid, and W. Radlik, "High mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors", J. Appl. Phys., Vol. 92, p. 5259, 2003
- [4] D. Knipp, R. A. Street, A. Völkel, and J. Ho, "Pentacene thin film transistors on inorganic dielectrics : Morphology, structural properties, and electronic transport", J. Appl. Phys., Vol. 93, p. 347, 2003
- [5] C. Drury, C. Mutsaers, C. HArt, M. Matters, and D. de Leew, "Low cost all polymer intergrated circuits", Appl. Phys. Lett., Vol. 73, p. 108, 1998
- [6] Michael D. Austin and Stephen Y. Chou, "Fabrication of 70 nm channel length polymer organic thin-film transistors using nanoimprint lithography", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, p. 4431, 2002
- [7] A. Bolognesi, A. Di Carlo, and P. Lugli, "Influence of carrier mobility and contact barrier height on the electrical characteristics of organic transistors", Appl. Phys. Lett., Vol. 81, p. 4646, 2002
- [8] Y. S. yang, S. H. Kim, J. I. Lee, H. Y. Chu, L. M. Do, H. Lee, J. O, and T. Zyung, "Deep level defect characteristics in pentacene organic thin films", Appl. Phys. Lett., Vol. 80, p. 1595, 2002

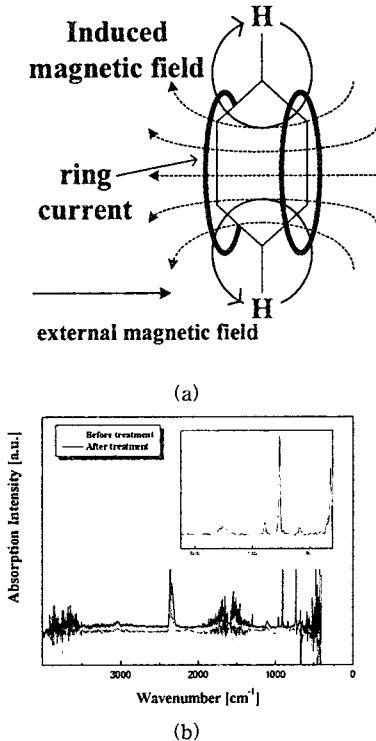


그림 6. (a) 고리 전류 효과와 (b) pentacene막의 FT-IR 스펙트럼.

3. 결 론

본 논문에서는 현재 유기 박막 트랜지스터에 가장 널리 사용되는 pentacene을 사용하여 교번자속 인가에 의한 어닐링 효과를 연구하였다. 교번자속을 이용한 pentacene막의 어닐링 처리는 pentacene막의 재결정화에 의해 전기 전도 특성을 향상시킬 수 있었다. 이러한 전기 전도도의 향상은 진공 furnace를 사용하여 직접적으로 열을 인가하는 어닐링을 통해서 일어나지 않았다. 그러므로 교번자속에 의한 유도 가열로써 pentacene막을 어닐링 시키는 것이 전기적 특성향상에 기여함을 알 수 있다. 그러나 교번자속에 의해 발생한 pentacene의 화학적 이동 현상이 전기 전도 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다. 그리고 향후 교번자속을 이용한 어닐링 처리를 통해 pentacene을 반도체 물질로 사용한 유기 박막 트랜지스터의 특성 향상을 기대할 수 있다.

이 연구(논문)는 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대정보디스플레이기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.