건식법에 의해 제조된 내열성 폴리이미드박막의 열적특성 및 습도감지특성

論 文
56-6-13

Thermal and Humidity Sensing Properties of Heat Resistant Polyimide Thin Film Manufactured by Dry Process

林 暻 範† · 金 冀 煥* · 黃 善 揚** · 金 鍾 潤*** · 黃 明 煥§
(Kyung-Bum Lim · Ki-Hwan Kim · Sun-Yang Hwang · Jong-Yoon Kim · Myung-Hwan Hwang)

Abstract - The aim of this paper is to establish the optimum fabrication condition of specimens, using the Vapor Deposition Polymerization Method(VDPM), which is one of modesto prepare functional organic thin films using a dry process, and to develop a thin film type humidity sensor which has good humidity sensitive characteristics. The inner part of the film became denser and roughness of the film surface eased as curing temperature increased so that thickness of the film could be made uniform. This also shows the appropriate curing temperature was 250℃. The basic structure of the humidity sensor is a parallel capacitor which consists of three layers of Aluminum/Polyimide/Aluminum. The result of SEM and AFM measurement shows that the thickness of PI thin films decreased and the refraction increased as curing temperature increased, which indicates that a capacitance-type humidity sensor utilizing polyimide thin film is fabricated on a glass substrate. The characteristics of fabricated samples were measured under various conditions, and the samples had linear characteristics in the range of 20~80 %RH, independent of temperature change, and low hysteresis characteristic.

Key Words : Vapor Deposition Polymerization Method, Thin film, Humidity sensor

1. 서 론

폴리이미드(PI)는 분자쇄의 경직성, 공명안정성, 강한 화학결합 및 diamine 유도체와 dianhydride 유도체간의 전자분극으로 인한 분자쇄간의 상호작용 등으로 인하여 연화점이 높고 내열성이 우수하다. 또한 산화나 내화학성 등에 좋은 안정성을 가지며 우수한 기계적 특성 및 전기적 특성을 가지고 있어 전자, 자동차, 항공우주산업 등에 사용되고 있다. 특히 높은 열적 안정성과 절연성은 microelectronics 산업에 필요로 하는 소재로서 사용되며 실리콘웨이퍼에 대한 친화성, 열팽창 및 흡습성 등의 개선으로 전자 및 산업용 접착제로서 뿐만아니라 금속대체 열경화성수지로서의 제품의 개량과 새로운 가공기술 개발의 필요성이 점차 증대되고 있다[1-3]. 따라서 이러한 요구들을 만족시키기 위해 열안정성, 내산화성, 전기절연성 등이 우수하다고 알려진 -SiO_2-결합을 PI에 도입시키고자 하는 관심이 증대되고 있다.

그러나 국내에서는 아직까지 생산하지 못하여 수요가 증가하고 있음에도 전량수입에 의존하고 있는 실정이다. 종래의 폴리이미드의 도포(coating)는 이의 전구체인 polyamic acid(PAA) 용액을 스피너(spinner)등을 이용하여 도포시켜 얻어진 막에서 용매를 제거하고, 그 후 열처리하는 것에 의해 얻어지지만 이러한 종래의 방법으로는 매우 얇은 막과 균일한 두께의 막을 얻기 어렵고 큰 면적을 갖는 박막을 도포하는데도 어려움이 있다. 또한 용매가 필름에 잔존하는 것과 용매를 사용함으로써 인체에 해로운 영향을 끼치는 것 등도 문제로 지적되고 있다.

그러나 진공증착중합(Vapor Deposition Polymerization, VDP)법은 수년 전에 시험되어진 새로운 박막 형성방법의 한가지로 서로 다른 단량체(monomer)를 진공중에서 가열증발시켜 중합 박막을 제조할 수 있다. 이 방법은 종래의 방법에서의 단점을 극복할 수 있으며, 비교적 간단한 장치로 박막을 성막할 수 있다는 특징과 반도체디바이스 제작시 일관시킨 건식 프로세스에 의해 박막을 제조하는 것이 가능하고, 또한 불순물이 들어가기 어려우며 박막을 배향제어 할 수 있는 가능성이 있다[4-7].

본 연구에서는 진공증착중합박막 제조장치를 이용하여 복수의 단량체 6FDA(Hexafluoroisopropyliden-2,2-bis[phthalicanhydride]와 DDE(4,4′-diaminodiphenyl Ether)를 중합하여 폴리아믹산을 만들고, 열경화에 의해 폴리이미드를 합성하였다.

제조된 박막에 대하여 열경화온도에 따른 박막의 열적 특성 및 분자구조분석에 의하여 폴리이미드 박막의 습도감지 특성을 검토하고자 한다.

2. 실 험

2.1 진공증착 중합법에 의한 폴리이미드의 합성기구

건식법의 하나인 진공증착중합VDP)법은 복수의 다른 두 단량체를 진공중에서 가열 증발시켜 기판 위에 입사시키면 단

† 교신저자, 正會員 : 韓國消防安全協會 · 工博
E-mail : kblim69@empal.com
* 正 會 員 : 韓國消防安全協會 · 工博
** 學生會員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 · 碩士
*** 正 會 員 : 仁荷大 工大 機械工學科 博士課程
§ 正 會 員 : 仁川大 工大 安全工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 2007年 2月 21日
最終完了 : 2007年 4月 2日

량체끼리의 충돌반응과 anhydride에 의한 아민의 아실화 반응이 일어나 유기 분자 관능기 자신의 성질에 의해 기판상에서 폴리아믹산(Polyamic acid 이하 PAA)박막으로 중합된다. 합성된 폴리아믹산을 열경화(thermal curing)나 탈수제(dehydrating agent)를 사용하여 고리탈수화(cyclodehydration)반응으로 폴리이미드가 제조된다. 그림 1에는 6FDA와 DDE 단량체가 증발되어 기판상에서 폴리아믹산박막(Polyamic acid 이하 PAA)으로 중합되고 열경화에 의해 폴리이미드로 되는 중합기구를 개략적으로 나타내었다[8].

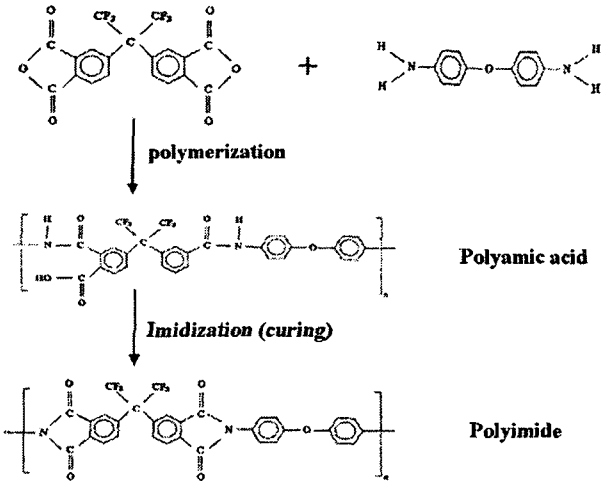

그림 1 진공증착중합에 의한 폴리이미드의 합성기구

Fig. 1 The mechanism of polyimide synthesis during vapor deposition polymerization

2.2 폴리이미드 박막의 제조

진공 증착 중합 장치는 크게 전원부, 배기 및 진공 검출, 증발 속도 검출부로 나뉘어 있다. 열원은 할로겐램프의 복사열을 이용하였고, 기판(Substrate)과 단량체의 증발 온도는 각각의 열전대에 의해서 온도를 검출하여 PID 온도 조절기(한영전자, HY-P100과 DX4)를 사용하여 제어하였다.

배기는 로터리 펌프 (Ulvac사 GCD-200XA) 와 확산 펌프 (Jeinteck. Co. , JUPS-150M)를 이용하여 10^{-6} torr이하의 진공으로 하였으며, 진공의 검출은 저진공 측정장치로서 TC(Varian Co., Vaccum gauge, type 0531)을 사용하였으며, 고진공 측정장치로는 vaccum ionization gauge (Varian Multi-Gauge , LB 350-301 ; $10\sim2\times10^{-10}$torr)를 사용하여 측정하였다. 단량체의 증발속도는 수정 진동자 막두께 측정장치(Maxtek, TM-103R)를 증발원 가까운 쪽에 위치시켜 단량체의 증발속도를 관찰하였다. 본 연구실에서 자체 제작된 진공증착중합장치(VDP)의 장치와 개략도를 그림 2에 나타내었다.

박막의 제작은 자체 설계 제작한 진공증착중합장치를 사용하여 진공반응조내에서 6FDA와 DDE를 중합하여 폴리아믹산을 만들고, 열경화에 의해 폴리이미드를 합성하였다. 폴리이미드(PI)박막 제조를 위한 실험 조건을 표 1에 나타내었다.

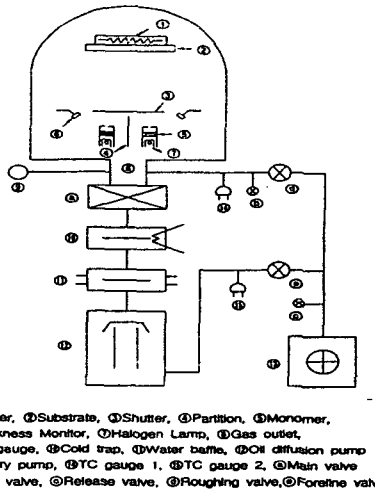

그림 2 진공증착중합 장치의 개략도

Fig. 2 Schematic diagram of vapor deposition polymerization apparatus

표 1 진공증착중합의 실험 조건

Table 1 Experimental condition of vapor deposition polymerization

구 분	6FDA·	DDE
Monomer의 증발온도	214±1℃	137±1℃
증착중 압력	>1×10^{-6} Torr	
기판온도	상 온	
증 착 율	240~350 Å/min	
증발원과 기판과의 거리	300 mm	
기 판	Glass, Quartz, KBr, Si	

3. 결과 및 고찰

3.1 열경화온도에 따른 박막의 표면분석

일반적으로 AFM(atomic force microscope)는 물질의 표면 연구에 있어 표면의 입체적인 정보뿐만 아니라, Angstrom 단위까지 표면의 원자배치를 아주 간단하게 파악할 수 있고 표면의 처리없이 자연상태 그대로 관찰이 가능하여 광범위하게 사용되고 있다.

주사형 전자현미경(SEM)을 이용하여 증착중합박막의 열경화 온도에 따른 폴리이미드 박막의 단면을 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 보면 (a) 200℃에서 박막의 두께는 약 0.40㎛ 정도로 막상태가 균일하지 못하지만, (d) 350℃에서 0.14㎛로 열경화 온도가 증가함에 따라 박막의 두께가 감소됨을 알 수 있었으며, 박막의 표면은 열경화 온도의 증가에 따라 균일해 짐을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 증착중합한 시료는 열경화 온도가 증가함에 따라 박막의 부피가 줄어들어 두께가 감소되고 표면의 상태가 균일하게 됨을 알 수 있었다.

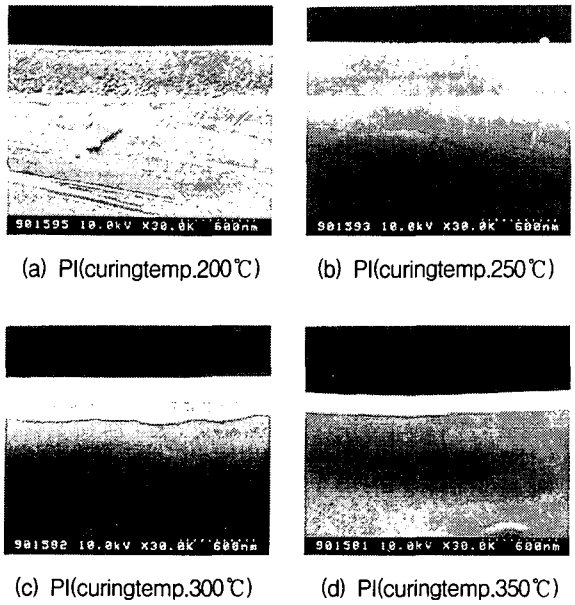

그림 3 열경화 폴리이미드 박막의 SEM 단면
Fig. 3 SEM cross section of cured polyimide thin film

0.5×0.5 μm^2 크기의 폴리이미드 박막의 열경화 온도에 따른 표면의 거칠기(roughness)와 표면의 미세구조(surface morpology) 형상은 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 4에서 보면 열경화시키지 않은 박막의 표면 거칠기는 5.97nm였지만 250℃로 열경화한 경우에는 3.17nm, 350℃로 열경화한 경우는 2.19nm로 열경화 온도가 증가함에 따라 표면의 거칠기 값은 감소됨을 알 수 있다. 또한, 그림 5의 형상에서 보면 열경화 온도가 증가함에 따라 입자가 성장되어 가고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 AFM과 Ellipsometer의 측정에서와 같이 열경화가 증가함에 따라 박막이 수축됨에 의해 내부의 기둥구조가 감소되고 박막이 표면상태가 균일해 짐으로써 보다 양호한 폴리이미드 박막을 형성할 수 있다고 생각되어진다. 즉, 열경화 온도가 250℃ 일 경우가 안정된 폴리이미드 박막이 제조되어지리라 생각되어진다.

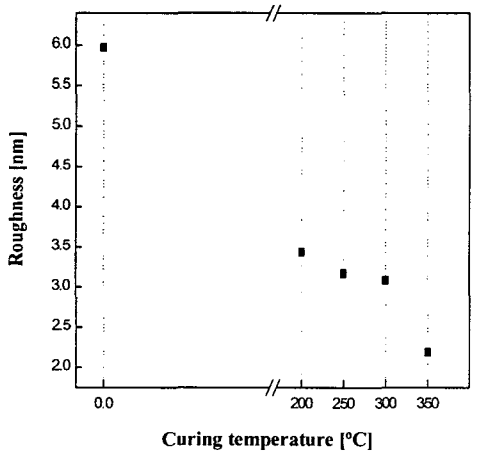

그림 4 열경화 온도에 따른 표면거칠기
Fig. 4 Roughness as a function of curing temperature

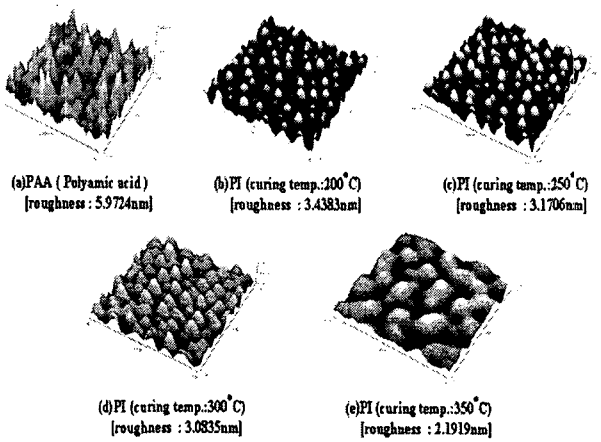

그림 5 열경화 온도에 따른 폴리이미드의 AFM 형상
Fig. 5 AFM image of Polyimide as a function of curing temperature

3.2 열분석 특성

짧은 시간에 재료의 수명을 추정하는 시험법으로 열분석법에 의해 미지 재료의 내열구분 또는 수명을 예측하고 있으나, 폴리이미드나 폴리아미드와 같은 고내열성을 갖는 것에 대해서는 그 예측에 대한 상관관계가 차이가 나고 있는데, 이것은 유리전이온도(T_g)와 관계가 있다.

Brown은 열중량(TG)곡선에서 중량감소 5%되는 온도(T_{TG})와 ASTM D2307 혹은 IEEE No. 57법등에 의해 조사된 수명시간 20,000시간에 대응하는 온도($T_{20,000}$)를 비교하여 그 상관 곡선을 구해 나타내었는데, 이것을 본 연구에서 측정된 값과 비교하였다[9]. 중합시 기판온도를 상온(20℃)에서 제조한 증착중합(PAA)박막의 TG-DTA특성을 그림 6에 나타내었다. 열경화시키지 않은 PAA박막은 열경화에 의해 폴리이미드가 되는데 그림 6에서 보면 150℃까지 열중량감소가 나타나지 않으며, 그 이후 300℃부근까지 감소하였다가 다시 500℃이후에 열중량감소가 급격히 일어나고 있다. 이것은 150℃~320℃부근의 온도에서 열경화에 의한 탈수개환으로 중량감소가 일어나며, 500℃이상에서는 열분해가 일어남을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 DTA곡선에서 알 수 있듯이 폴리아믹산박막이 폴리이미드로 탈수 개환하면서 발생하는 물질로 인하여 발열반응이 일어나고 있으며, 500℃이상에서는 열분해에 따른 발열반응이 일어나고 있는 것으로 확인할 수 있다. 그러므로 중량감소가 5%되는 점의 온도를 300℃이상에서 중량감소가 거의 없는 부분을 기준으로 해서 구해야 하므로 여기에서는 T_{TG}를 구하는 것은 의미가 없는 것으로 생각된다[10,11]. 그림 7은 20℃에서 제조한 박막으로 150℃부근에서의 탈수개환에 따른 TG의 중량감소 및 DTA의 반응피이크가 나타나지 않음을 알 수 있으며, 500℃이상까지는 중량감소가 심하지 않다. 그림 7의 폴리이미드 박막의 5% 중량감소온도는 560℃이었으며, 이것은 Brown이 보고한 결과와 비교하여 보면 상온에서 제조한 박막이 대략 230℃에서 200,000시간 견딜 수 있는 것이다[9].

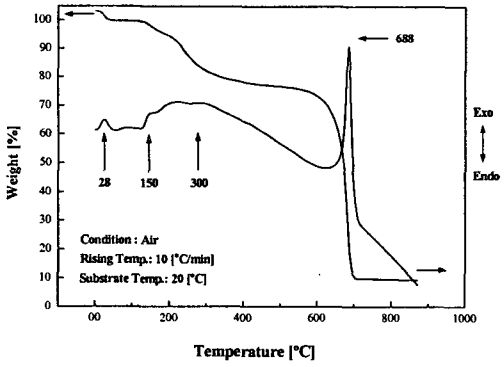

그림 6 진공증착중합박막의 TG-DTA 곡선(기판온도 : 20℃)

Fig. 6 TG-DTA curve of VDP thin film (Substrate temp. : 20℃)

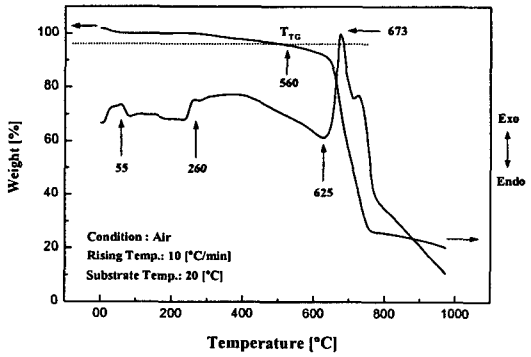

그림 7 폴리이미드박막의 TG-DTA 곡선(기판온도 : 20℃)

Fig. 7 TG-DTA curve of ploylmide thin film(Substrate temp. : 20℃)

또한 그림 8은 진공증착중합법에 의해 제조한 폴리이미드 박막의 시차주사열량분석의 결과이다. Perkin-Elmer사의 DSC-7와 Shimadzu사의 DSC를 사용하여 질소기류하에서 승온속도 20℃/min으로 하여 각각의 환경에서 curing한 시료를 약 10mg을 채취하여 시료에 따라 250℃~300℃까지 1차로 주사한 후에 10분간 annealing한 후, 실온까지 급냉하여 다시 원하는 온도까지 2차 주사한 다음 열용량차가 가장 급격한 곳의 중간점을 유리전이온도(Tg : Glass transition temperature)로 채택하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 열경화시키지 않은 박막(PAA)에서는 유리전이온도(T_g)가 나타나지 않았으며, 200℃, 250℃, 300℃, 350℃에서는 각각 258.47℃, 273.7℃, 282.22℃, 286.38℃의 유리전이온도(T_g)가 관측되었다.

열경화 온도가 증가함에 따라 유리전이온도가 증가하는 것은 열경화에 의해 축합반응이 일어나 탈수개환되어 폴리이미드가 되는 것으로 설명할 수 있으며, 또한 rigidg한 페닐기 사이에 hexafluoroisopropylidene기와 에테르기가 도입된 경우, bulky한 hexafluoroisopropylidene기가 주쇄의 운동을 증가시키기 때문이다. 일반적으로 diamine 구조에서 $-CH_3$-기가 도입된 폴리이미드보다 $-CF_3$-기가 도입된 폴리이미드가 더 높은 열적 안정성을 나타낸다. 이는 C-H 결합에너지(105.4 Kcal/mol)가 C-H 결합에너지(98.8 Kcal/mol)보다 더 크므로 열경화 온도가 증가함에 따라 열분해 온도가 증가하기 때문이다.

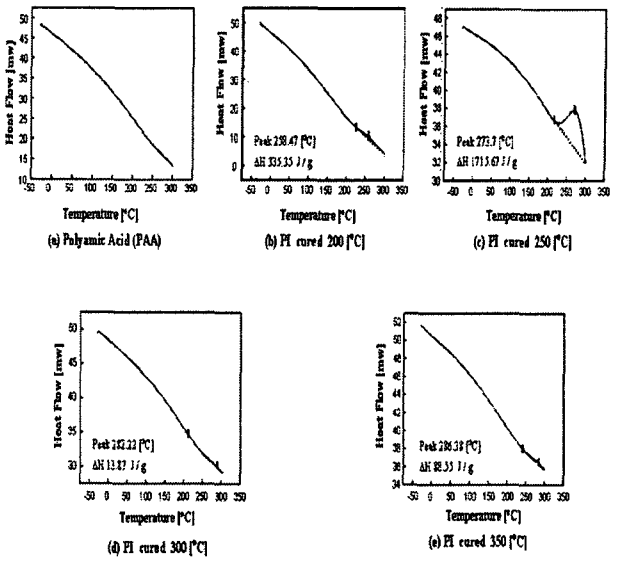

그림 8 열경화 온도에 따른 DSC 곡선

Fig. 8 DSC curve as a function of curing temperature

3.3 습도센서의 특성

본 연구에서는 상대습도와 온도의 조절을 위하여 광명과학사(Kwang Myong Scientific Co., LTD)에서 제작된 KM3-1 항온항습조(Constant Temperature & Humidity Chamber)를 사용하였다. 사용된 항습조는 온도범위 -40℃~100℃까지 상대습도를 조절할 수 있도록 되어 있으며 ±3% 상대습도의 정확도를 갖는다. 제작된 습도센서소자의 정전용량 값은 임피던스 분석기(Impedence analyzer, Hewlett Packard, LF 4192A)를 사용하여 측정하였다. 열경화온도에 따른 폴리이미드 박막의 습도감지 특성을 그림 9에 나타내었다. 200℃에서 열처리한 시편은 상대습도 증가에 따른 급격한 정전용량 증가가 관측되었으며, 또한 300℃와 350℃로 열처리한 시편은 거의 평탄한 특성을 보여 센서로서 적합하지 않았다. 250℃로 열처리한 시편은 상대습도가 증가함에 따라 선형적인 특성을 나타내므로써 250℃로 열처리한 폴리이미드 박막을 감습막으로 채택하였다.

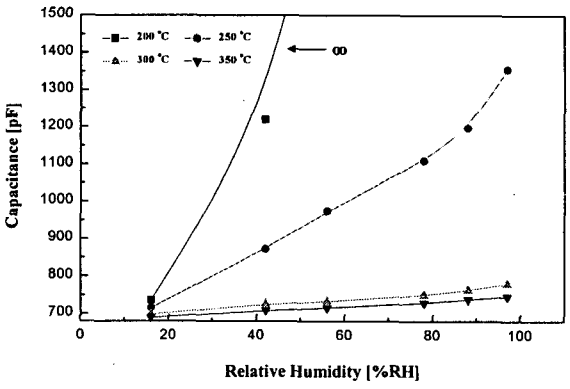

그림 9 열경화온도에 따른 상대습도 대 정전용량 특성 (f=1kHz)

Fig. 9 Capacitanace vs. relative humidity characteristics as a funnction of curing temperarure at f=1kHz

다음은 측정주파수에 따른 출력특성을 그림 10에 나타내었다. 이 때 사용된 측정주파수는 120Hz, 1KHz와 10KHz이며, 폴리이미드 박막의 두께는 0.37㎛이다. 그림에서와 같이 1KHz이상의 측정주파수에서 출력값은 상대습도 20~80% 사이의 범위에서 선형적인 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 120Hz의 주파수에서 측정한 경우에 고습에서의 급격한 정전용량의 증가에 따른 출력특성의 저하를 볼 수 있다.

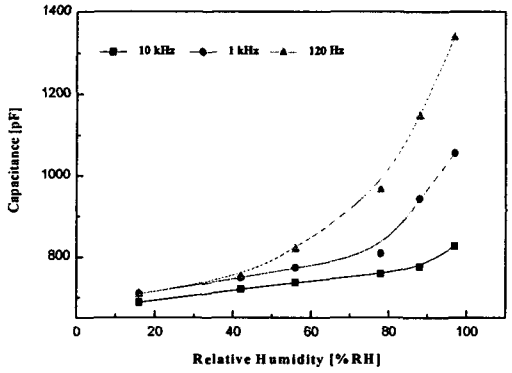

그림 10 폴리이미드 박막의 습도감지 특성 (T = 20℃)

Fig. 10 Humidity sensing characteristics of polyimide thin film at 20℃

그림 11은 폴리이미드 박막의 두께를 0.37㎛로 한 경우와 0.63㎛, 0.88㎛로 형성한 경우에 두께의 변화에 따른 습도센서의 출력특성을 보여주고 있다. 이 때 측정에 사용된 주파수는 1kHz이다. 평행판 커패시터의 일반적인 성질과 마찬가지로, 폴리이미드 박막의 두께가 얇을수록 정전용량의 값이 커짐을 알 수 있다.

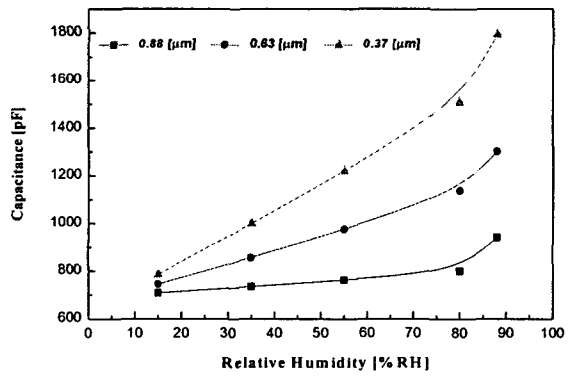

그림 11 폴리이미드 박막 두께에 따른 상대습도 대 정전용량 특성

Fig. 11 Capacitance vs. relative humidity as a polyimide thin film thickness

그림 12는 전극의 폭과 간격을 달리 했을때의 출력특성을 보여주고 있다. 센서의 면적과 박막의 두께가 같은 두 시료를 전극의 선폭과 간격의 비를 각각 20㎛ : 10㎛ , 10㎛ : 10㎛로 하였다. 이 때 측정에 사용된 주파수는 1kHz이며, 폴리이미드 박막의 두께는 0.37㎛이다. 정전용량은 전극의 유효면적에 비례하므로 선폭이 큰 것이 더 큰 정전용량을 보이는 것을 알 수 있다.

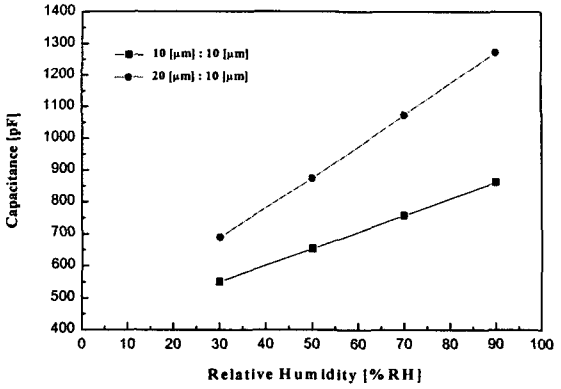

그림 12 전극선폭에 따른 상대습도 대 정전용량 출력특성

Fig. 12 Capacitance vs. relative humidity output characteristic as a electrode width

그림 13은 주위의 온도를 달리하면서 습도센서의 정전용량을 측정한 경우의 그래프이다. 그림에서와 같이 폴리이미드 습도센서의 경우 온도변화에 따라서 출력값이 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 하지만, 80℃에서 측정한 경우에 고습영역에서 정전용량 값이 상승하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 물분자의 유전상수가 온도상승함에 따라서 증가하기 때문인 것을 알 수 있다.

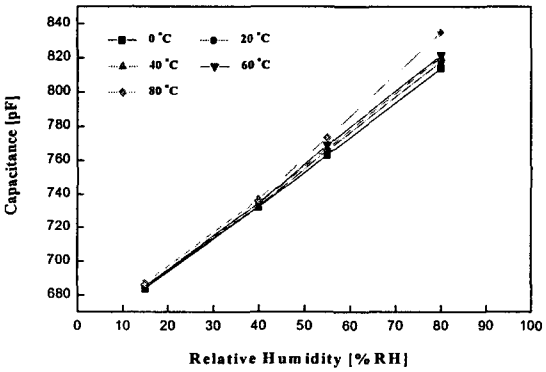

그림 13 온도에 따른 정전용량 출력특성

Fig. 13 Capacitance output characteristic as a temperature

그림 14는 1kHz의 주파수에서 측정한 습도센서의 히스테리시스(hysteresis) 특성을 보여주고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 상용습도센서의 허용 오차범위는 ±2.5%RH이다. 본 논문에서 제작된 습도센서의 히스테리시스의 특성은 ±2%RH의 범위에서 관찰되었다.

그림 15는 제작된 센서의 응답특성을 나타낸 그림이다. 실험은 30%RH에서 90%RH로의 흡습과정과 30%RH의 탈습과정으로 측정하였다. 습도센서의 응답은 흡습과정이 탈습과정보다 훨씬 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 이러한 것은 흡습과 탈습과정 동안에 기공안의 wetting angle의 차이에 의한 것이나 또는 폴리이미드 박막의 표면에 형성된 미세한 크기의 기공에 기인하는 것으로 생각된다.

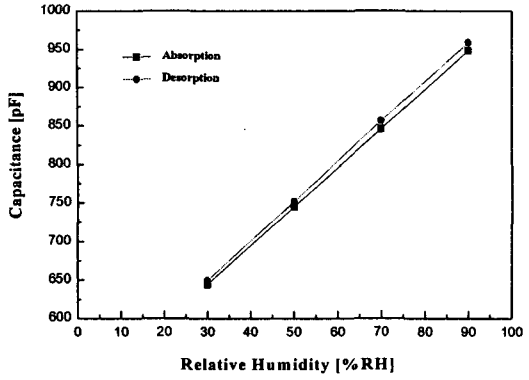

그림 14 습도센서의 히스테리시스 특성

Fig. 14 Hysteresis characteristic of humidity sensor

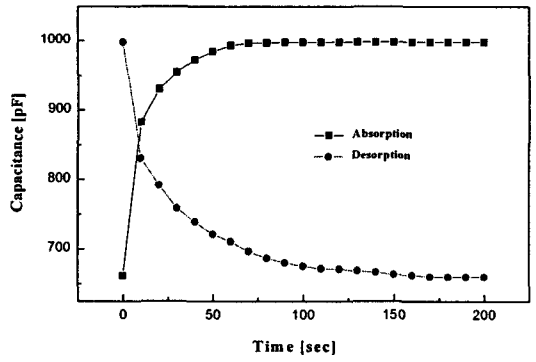

그림 15 응답 특성

Fig. 15 Response characteristic

4. 결 론

본 연구는 기능성 유기박막을 건식법으로 제조하는 방법 중의 하나인 진공증착중합장치를 이용하며, 단량체 6FDA와 DDE를 사용하여 중합박막(PAA)을 만들고, 열경화에 의해 폴리이미드(PI) 박막을 제조하여 최적의 열경화 온도를 구한 다음 폴리이미드를 이용한 습도센서를 제조하였고 여러 가지 조건하에 따라서 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 최적의 열경화 온도를 알아보기 위해 SEM, AFM등을 측정한 결과 열경화 온도가 증가함에 따라 박막내의 내부기둥구조의 감소로 인한 조밀도가 증가하여 굴절율은 증가됨을 알 수 있었으며, 박막의 표면 또한 열경화 온도가 증가함에 따라 균일해짐을 알 수 있었다.

② TG를 이용하여 ASTM 2307과 IEEE No.57법에 의해 구해진 수명시간 20,000 시간과 대응하는 온도인 TG곡선의 5% 중량감소온도(T_{TG})를 구하여 내열특성을 조사한 결과, 열경화시킨 박막에서의 T_{TG}는 기판온도 20℃에서 560℃이었으며, 기판온도 20℃에서 제조한 박막은 230℃에서 20,000시간동안 견딜수 있음을 평가할 수 있었다. 또한 DSC 측정에서는 열경화 온도가 증가함에 따라 유리전이온도가 증가함을 알 수 있었다 이는 열경화 온도가 증가함에 따라 폴리아믹산을 거쳐 폴리이미드로 고리탈수화 반응에 의해 즉, 탈수개환에 의한 축중합으로 폴리이미드가 됨을 알 수 있었다.

③ 제작된 폴리이미드 습도센서는 상대습도 20 ~ 80%의 범위에서 선형적인 출력특성을 나타내었으며, 또한 폴리이미드 습도센서의 경우에 온도에 대한 의존도가 거의 나타나지 않았으며, 무시할만한 히스테리시스 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 일부는 2006년도 인천대학교 교내학술연구비지원에 의하여 수행되었음

참 고 문 헌

[1] C. E. Srong, Polyimides: Fundamentals and Applications, ed. by Malay K. Chosh, Marcel Dekker, New york, p. 1-5(1996).

[2] W.J. Park, S.G. Yoon, W.S. Jung and D.H. Yoon, "Effect of dielectric barrier discharge on surface modification characteristics of polyimide film", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, Issues 9-11, pp. 5017-5020(2007).

[3] D. Briand, S. Colin, A. Gangadharaiah, E. Vela, P. Dubois, L. Thiery and N.F. de Rooij, "Micro-hotplates on polyimide for sensors and actuators", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 132, Issue 1, pp. 317-324(2006).

[4] S.W. Pyo, D.H. Lee, J.R. Koo, J.H. Kim, J.H. Shim, J.S. Kim and Y.K. Kim, "Electrical Effect in Organic Thin-Film Transistors Using Polymerized Gate Insulators by Vapor Deposition Polymerization (VDP)", Synthetic Metals, Vol. 154, Issues 1-3, pp. 141-144(2005).

[5] Kazuo Iida, Shuhei Nakamura and Goro Sawa, "Dielectric Breakdown and Molecular Orientation of Poly(4,4′- oxydiphenylene pyromellitimide)", Jpn. J. Appl. Phys., 33-1(11), pp.6235-6239(1994).

[6] M. Jandke, K. Kreger and P. Strohriegl, "Poly (phenylquinoxalines) by vapor deposition polymerization", Synthetic Metals, Vol. 111-112, pp. 221-223(2000).

[7] Boong-Joo Lee, Hyeong-Gweon Kim and Duck-Chool Lee, "Electrical properties of polyimide thin films formed by the vapor deposition polymerization method", Surface and Coatings Technology, Vol. 150, Issues 2-3, pp. 182-187(2002).

[8] J. H. Kreuz, A. L. Endrew, F. P. Gay, C. E. Sroog : J. of Polym. Sci., 42067(1967).

[9] Gorden P. Brown, Doris T. Haon, and Max Metaly, "The use of Thermal Analysis Methodes for the Estimation of Thermal life Rating of Magnet Wire Enamels", IEEE Trans, Elec Insul., EI-8(2), pp.36-41(1973).

[10] M. H. Brink, Polymer., Vol.35, p.5018(1994).
[11] T. Matsuura, M. Ishizawa, Y. Hasuda, S. Nishi, Macromolecules, 25, pp.3540-3545(1992).

저 자 소 개

임 경 범 (林 暻 範)

1969년 9월 18일생. 1993년 인천대 산업안전공학과 졸업. 1999년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년~현 한국소방안전협회
Tel : (032) 569-1971
Fax : (032) 569-1973
E-mail : kblim@kfsa.or.kr

김 기 환 (金 冀 煥)

1968년 12월 14일생. 1992년 호서대 산업안전공학과 졸업. 1997년 충북대 대학원 안전공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 안전공학과 졸업(공학박). 2004년~현 한국소방안전협회
Tel : (042) 638-4119
Fax : (042) 643-7119
E-mail : kkh7202@hanmail.net

황 선 양 (黃 善 揚)

1998년 인하대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사).
Tel : (032) 860-7393
Fax : (032) 863-5822
E-mail : sunsheep2000@yahoo.co.kr

김 종 윤 (金 鍾 潤)

1974년 1월 28일생. 1996년 인천대 산업안전공학과 졸업, 2001년 동 대학원 안전공학과 졸업(공학석사). 2002년~현 인하대 기계공학과 박사과정.
Tel : (032) 862-7313
E-mail : sweat100@hanmail.net

황 명 환 (黃 明 煥)

1955년 2월 10일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 일본대학 이공학부 전기공학과 공학석사학위 취득. 1987년 일본대학 이공학부 전기공학과 공학박사 학위 취득. 1987년 일본대학 이공학연구소 연구원. 1989년 일본노동성 산업안전연구소 위탁연구원. 1990년 인천대학교 산업안전공학과 조교수. 1995년 중소기업청 국립기술품질원 전기과. 1998년~현재 인천대학교 안전공학과 교수
Tel : (032) 770-8296
Fax : (032) 770-4399
E-mail : mhhwang@incheon.ac.kr