

PZT 박막 적외선 감지소자의 적외선 흡수층으로 증착된 니켈 박막의 광학 및 전기적 특성 분석

고 종 수*

(2004년 5월 31일 접수, 2004년 9월 17일 심사완료)

Absorptance and Electrical Properties Evaluation of Nickel Layer Deposited onto Thin Film Pyroelectric PZT IR Detector

Jong Soo Ko

Key Words: Infrared Absorption Layer(적외선 흡수층), Infrared Detector(적외선 감지소자), PZT, Nickel(니켈), Micromachining(미세가공기술)

Abstract

A nickel layer was deposited onto the PZT thin films, serving both as a selective radiation absorption layer and as a top electrode. The absorption properties of such nickel coated multi-layered infrared detectors were studied in the visible and infrared wavelength ranges. The optimal thickness of the nickel layer on our substrate was 10nm. The maximum absorption coefficient of the deposited 10 nm thick nickel layer was 0.7 at a 632nm wavelength. However, a striking asymmetric polarization hysteresis loop was observed in these PZT thin films with nickel as the top electrode. This asymmetric polarization was attributed to the difference between the dynamic pyroelectric responses in these Ni/PZT/Pt films poled either positively or negatively before the measurement. A positively poled film showed a 40% higher voltage response than a negatively poled detector.

1. 서 론

성능 좋은 적외선 감지소자 개발을 위한 기본적이고도 우선시 되는 연구내용으로, 성능지수가 뛰어난 가열전기(pyroelectric)재료의 개발, 열손실을 줄일 수 있는 구조의 제안, 그리고 입사되는 적외선을 가능한 한 많이 흡수할 수 있는 적외선 흡수층의 개발을 들 수 있다. 소자의 경박단소(輕薄短小)화 추세에 따라, 덩어리형으로 제작되던 가열전기재료가 수 마이크로미터 두께 이하의 박막으로 대체되고 있을 뿐만 아니라, 미세가공

기술(micromachining)의 출현으로 단위 감지소자의 크기가 수십 마이크로미터 이내의 크기로 극소화되고 있다. 적외선 감지소자의 전체적인 성능향상에 적외선 흡수층이 중요한 역할을 한다고 잘 알려져 있지만, 새로운 구조의 제안 및 적외선 감지재료의 개발에 비해 - 미세가공기술로 개발되고 있는 극소형 적외선 감지소자에 적합한 - 적외선 흡수층에 관한 연구는 미진한 편이다.

일반적으로 흡수층은 Fig. 1에서와 같이 워전극 위에 부가적으로 입혀진 얇은 막으로서, 입사되는 적외선의 흡수를 증가시킨다. 입사된 적외선의 흡수율과 적외선 감지소자의 성능이 정비례 관계에 있으므로, 흡수층은 적외선 감지소자의 성능에 가장 직접적인 영향을 주는 요소라고 말할 수 있다. 일례로, 흡수층이 0.5의 흡수도 밖에 가지지 못한다면, 이는 곧 적외선 감지소자의 성능이 50% 저하됨을 의미한다.

† 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : mems@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2488 FAX : (051)514-0685

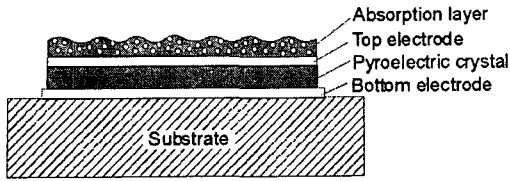


Fig. 1 Apparatus of radiation absorption layer of conventional pyroelectric detectors

일반적인 적외선 감지소자의 경우, 윗전극으로 쓰이는 금 위에 다공질의 검은색 물질(gold black, carbon black, platinum black)을 코팅한 층이 흡수층으로 널리 사용되고 있다.^(1,2) 하지만 이러한 다공질의 검은색 흡수층은 자체적으로 매우 큰 열질량을 가지고 있어서, 흡수된 에너지가 가열전기재료의 온도를 올리는데 효과적으로 기여하지 못한 채 상당량의 에너지가 흡수층 자체 내에서 소모되어 버린다는 단점을 가지고 있다. 그리고 이 같은 열손실 과정에서 발생하는 응답시간 지연도 적외선 감지소자의 성능을 저하시키는 요인이 된다. 또한 이러한 흡수층은 가열전기재료의 윗전극으로 사용할 수 없기 때문에 별도의 윗전극을 형성하는 금속층의 필요하다는 문제점 외에, 접착력이 약한 다공질 층을 손상없이 다루기가 쉽지 않다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결할 방안으로 제시된 것이 반투명의 전도층을 흡수층으로 사용하는 것이다. 그 한 예로 니켈을 들 수 있는데, 가열전기박막 위에 증착된 반투명의 얇은 니켈층은 열질량이 작고 입사된 빛의 흡수 및 투과율이 뛰어난 뿐만 아니라, 니켈층 자체를 윗전극으로 사용할 수 있어서 윗전극을 위한 추가적인 금속층이 필요없다는 장점이 있다. 이러한 장점을 지닌 니켈은 실리콘 미세가공기법으로 제작되는 초박막 극소형 적외선 감지소자의 적외선 흡수층으로 아주 적합한 재료라고 생각된다. 적외선 흡수층으로서의 니켈 박막에 대한 연구가 수행된 바 있으나, 적외선 감지재료로 많은 연구가 이루어진 PZT 가열전기박막 위에서의 성능특성에 대한 체계적인 연구가 거의 이루어진 바가 없다.⁽³⁻⁷⁾

적외선 감지소자의 제작에 앞서, PZT로 제작된 적외선 감지소자의 적외선 흡수율을 높일 수 있는 니켈 층의 최적두께와, 이의 광학 및 전기적 특성을 확인할 필요가 있다. 이를 위하여 상용소프트웨어로 니켈 층의 최적 두께를 구하였으며,

니켈 흡수층을 제작한 후 해석결과와 비교·검토하였다. 니켈 흡수층 증착에 앞서 준비된, Pt/Ti/Si₃N₄/SiO₂/Si 기판과 PZT30/70 (Zr:Ti=30:70) 가열전기박막의 제조공정에 관한 자세한 사항은 별도의 논문에 발표하였다.⁽⁵⁾ 이와 더불어, 본 연구에서는 Ni/PZT/Pt와 같은 상·하의 비대칭 전극 물질 때문에 생길 수 있는 특이현상을 확인하고자, Pt/PZT/Pt와 같은 대칭형 전극구조를 가진 시편을 제작하여 전기적 특성을 비교하였다.

제작된 PZT 및 Ni/PZT의 반사도를 측정하기 위하여, 600~1100nm 파장대역에서는 Filmetrics사의 F-20 박막 두께 측정 시스템을 사용하였고, 1~14 μ m 파장 대역에서는 Perkin-Elmer사의 Spectrum 2000 FTIR 스펙트로미터를 사용하였다. 이렇게 두 파장대역을 나누어서 측정한 이유는, He-Ne 레이저에서 나오는 빛의 파장이 632nm이고, 대기의 창에 해당하는 적외선의 파장대역이 3~5 μ m이기 때문이다.

한편, P-E 이력 특성을 확인하기 위하여 Radiant Technologies사의 RT66A Standard Ferroelectric Test System을 사용하였으며, 시편의 동적 가열전기 성능특성을 보기 위하여, 입사광으로 632nm 파장의 He-Ne 레이저를 이용하여 Chynoweth 시스템을 구성하였다.⁽⁵⁾ 이 때 제작된 시편의 측정 위치에서 확인한 레이저광의 단위면적당 파워는 $9.2 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ 이었다.

2. 니켈 흡수층의 최적 두께

550nm 두께의 PZT 가열전기박막 위에 증착될 니켈 흡수층의 최적 두께를 계산하기 위하여 Zhejiang(浙江) 대학교에서 개발한 박막 디자인 상용소프트웨어인 Autofilm 1.0을 사용하였다. 계산에 사용된 재료상수를 표 1에 정리하였다.

Fig. 2는 632nm 파장의 빛이 입사되는 경우, PZT/Pt/Ti/Si₃N₄/SiO₂/Si 위에 증착될 니켈 흡수층의 두께 증가에 따른 흡수율의 변화를 계산한 것이다. 니켈 흡수층이 없을 때 약 50%이던 흡수율이 니켈의 두께가 증가함에 따라 높아지다가, 7.5nm에서 82%로 최대가 된다. 그 후, 니켈의 두께가 증가함에 따라 흡수율은 서서히 감소하기 시작하고 25nm 이상의 두께에서는 흡수율이 50% 이하로 떨어진다.

니켈 층은 입사되는 적외선의 흡수를 담당함과

동시에 적외선 감지소자의 윗전극으로도 사용된다. 그러므로 니켈 층의 두께를 결정할 때에는, 흡수율 관점에서뿐만 아니라 박막자체가 가지는 전기적인 특성도 함께 고려하여야 한다. 니켈 흡수층의 두께가 극도로 얇아지면 저항이 너무 커지기 때문에 회로의 임피던스 조절에 문제가 생길 수 있다. Fig. 3은 니켈 층의 두께에 대한 저항의 변화를 실험한 결과로서, D. Lienhard 등이 발표한 논문에서 발췌한 것이다.⁽⁸⁾ Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 니켈 층의 두께가 10nm에 이르기까지 저항값이 기하급수적으로 감소하다가, 이 두께를 넘어서면서부터 감소폭이 크게 줄어든다. 니켈 층이 두꺼울수록 저항이 감소하여 회로측면에서 이로운 점이 있지만, 일정 두께 이상을 넘어가면 불투명막이 되어 버리기 때문에 흡수층으로서의 역할을 상실하게 된다. 이러한 이유로 상층관계에 있는, 흡수율과 저항을 잘 절충하여 니켈 층의 두께를 결정할 필요가 있다. 본 논문에서는 Fig. 2와 Fig. 3의 결과를 근거로 하여 니켈 층의 두께를 10nm로 정하였으며, 이 두께에서의 이론적 흡수율은 80%로서 최대흡수율과 큰 차이가 없다.

3. 니켈 흡수층의 광학 및 전기적 특성

3.1 광학적 특성

Fig. 4의 해석 결과에서 볼 수 있듯이, 흡수율은 입사되는 빛의 파장에 따라 크게 달라진다. PZT 박막은 600~1100nm 파장대역에서는 620nm 및 780nm에서 최고 86%의 흡수율을 가지며, 940nm에서 최소 24%의 흡수율을 가진다. Ni/PZT의 최대 및 최소 흡수율과 파장에 따른 흡수율 변화 추이 또한 PZT 박막이 가지는 광학특성과 매우 유사하다. 하지만 이러한 유사성은 Fig. 4(b)에서와 같이 파장이 2 μ m 이상으로 길어지면서 깨어지기 시작한다. 두 시편의 흡수율 차이는 파장이 길어질수록 더 큰 편차를 보이는데, 4 μ m 근방에서는 PZT 박막의 흡수율은 10%, Ni/PZT 박막의 흡수율은 70%를 보일 정도로 격차가 벌어진다. 이 같은 해석결과로부터 PZT 가열전기박막의 윗전극으로도 사용되는 니켈 층이 적외선 흡수에 아주 적합한 물질임을 알 수 있다.

특히, 이 니켈 층은 4 μ m 근방의 파장영역에서 뛰어난 흡수율을 보이므로 중파장대의 적외선 감

Table 1 Values of optical parameters for theoretical calculation

Media	n	k	Optical thickness n · d (nm)
Air	1.0	0	∞
Ni	2.012	3.947	variable
PZT	2.4	0	1440
Pt	2.3	4.07	230
Ti	2.937	3.595	147
Si ₃ N ₄	1.73	0	340
SiO ₂	1.458	0	725
Si	4.271	0.577	∞

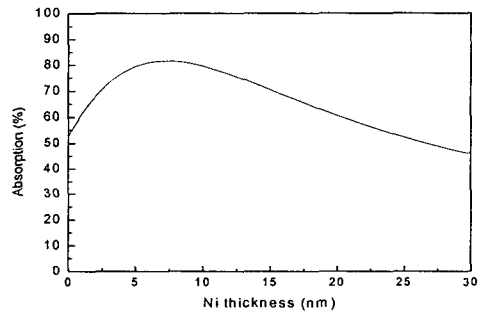


Fig. 2 Absorption ratio as a function of Ni thickness

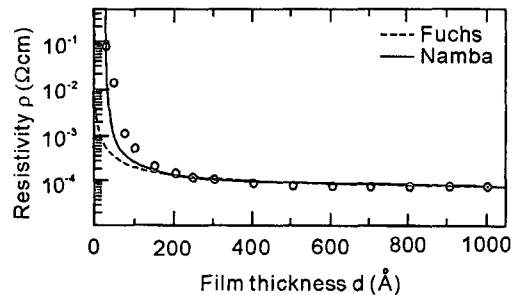


Fig. 3 Thickness dependence of the resistivity⁽⁶⁾

지소자의 성능을 높이는데 크게 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 이론적인 해석과정을 통해, 다층 구조를 가진 적외선 감지소자의 각 층의 두께를 조절함으로써, 손쉽게 Ni/PZT/Pt

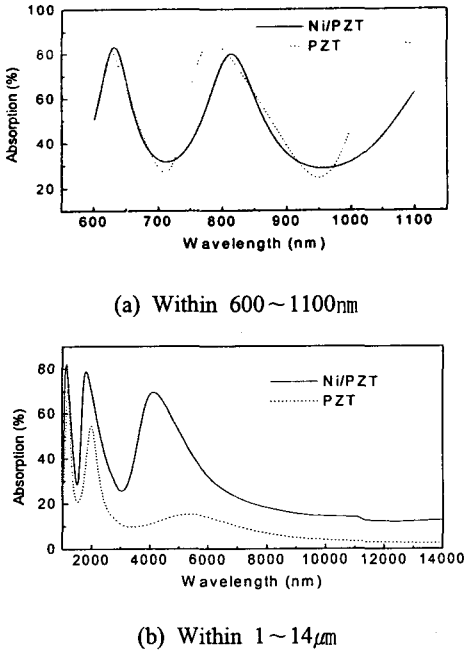


Fig. 4 Calculated optical absorption for detectors

다층박막의 다양한 광학특성을 예측할 수 있다.

이론적인 해석결과를 실험적으로 검증하기 위하여 550nm 두께의 PZT 박막 위에 10nm 두께의 니켈을 스퍼터링 방법으로 증착한 후, 흡수율을 측정하였다. Fig. 5는 제작한 PZT와 Ni/PZT 시편의 파장에 따른 흡수율 측정결과를 보여준다.

파장에 따른 흡수율의 변화추이는 측정결과와 이론적인 해석결과가 거의 일치하지만, 흡수율의 절대값은 측정값이 이론값에 비해 다소 낮았다. 일례로, 동적 가열전기 성능측정에 사용될 He-Ne 레이저광의 파장인 632nm에서는, 이론적 흡수율이 80%인데 반해 측정된 흡수율은 70% 이었다.

니켈은 높은 흡수율과 더불어 기존의 다공질의 검은색 흡수층이 가지고 있는 높은 열질량의 단점도 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 윗전극을 위한 추가적인 금속 증착 작업이 필요없기 때문에 적외선 감지소자의 성능향상 및 공정단순화에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 전기적 특성

적외선 감지소자의 성능에 직접적인 영향을 주는 가열전기재료의 분극상태에 관해서는 수많은

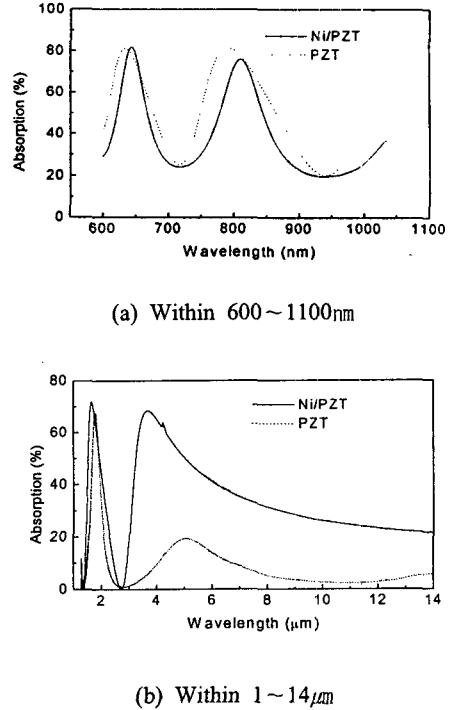


Fig. 5 Measured optical absorption for detectors

연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 적외선 흡수층 역할과 동시에 윗전극 역할까지도 겸한 니켈 층의 전기적 특성을 확인하기 위하여, 두가지 다른 다층구조의 시편을 제작 및 측정하였다. 그 중 하나는 본 연구에서 사용하는 Ni를 증착한 Ni/PZT/Pt의 비대칭 구조이며, 다른 하나는 Pt/PZT/Pt의 샌드위치형의 대칭구조이다.

두 가지 다른 윗전극을 가진 시편은 공정에서 오는 외부오차를 최소화하기 위하여 같은 웨이퍼 위에 제작하였으며, 다만 최종 윗전극 증착 공정만 별도로 수행하였다. 증착한 두 윗전극의 두께는 Ni와 Pt가 각각 10nm, 80nm 이었다. Fig. 6은 두 시편의 P-E 이력특성 측정결과를 나타낸다.

이 결과에서 Ni/PZT/Pt의 P-E 이력곡선이 오른쪽으로 치우친 것을 볼 수 있는데, 이는 외부에서 가해진 전기장에 대해 분극시 비대칭의 스위칭 특성을 갖는다는 것을 의미한다. 여기서 오른쪽으로 치우쳤다는 의미는 외부의 전기장이, Fig. 7에서와 같이 양의 방향으로 가해졌을 때,

상대적으로 분극효과가 더 크게 나타난다는 것을 뜻한다. 반면, Pt/PZT/Pt의 측정결과 Ni/PZT/Pt와는 달리 P-E 이력곡선이 좌우대칭 형상을 보이는데, 이는 분극정도가 외부전기장의 방향에 영향을 받지 않음을 의미한다.

Pt/PZT/Pt와 같은 대칭구조에서는, PZT와 윗전극 및 아래전극의 양 계면에서의 도메인 피닝(domain pinning)이나 스윗칭(switching) 특성이 유사하므로 대칭적인 P-E 루프가 나오는 것은 당연한 것으로 여겨진다.

반면, Ni/PZT/Pt 구조에서는 PZT와 Ni의 계면, 그리고 PZT와 Pt의 계면에서의 도메인 피닝 및 스윗칭 정도가 다르게 나타나며, 이같은 현상이 결국 P-E 이력곡선을 오른쪽으로 치우치게 하는 원인이 된 것으로 생각된다. 이러한 특성을 좀 더 구체적으로 확인하기 위하여 Ni/PZT/Pt 시편을 양의 방향 및 음의 방향으로 250kV/cm의 전압을 가하여 분극처리한 후, 각 소자에서 발생하는 가열전류(pyroelectric current)의 크기를 측정하였다. 이를 위하여 632nm 파장의 He-Ne 레이저를 이용한 Chynoweth 측정 시스템을 구성하였다.⁽⁵⁾

Fig. 8의 측정결과 그래프는 양의 방향으로 분극 처리했을 때와 음의 방향으로 분극 처리했을 때, 적외선 감지소자의 성능이 어떻게 달라지는지를 명확하게 보여준다. 양의 방향으로 분극처리한 소자의 성능이 음의 방향으로 분극처리한 시편에 비해 약 40% 정도 높게 측정되었다. 이와 같은 현상은, 음의 방향으로 분극처리시 상당

수의 O⁻ 이온이 Ni와 반응을 함으로써, Ni/PZT 계면에서 산소공공(oxygen vacancy)이 급속히 늘어났기 때문에 추측된다. 이렇게 생겨난 산소공공은 도메인 분극의 스윗칭을 더욱 어렵게 만든다.

이러한 실험결과에서 확인할 수 있듯이, 다른 물질로 상부 및 하부전극을 제작했을 경우에는 분극처리 방향에 따라서 적외선 감지소자의 성능

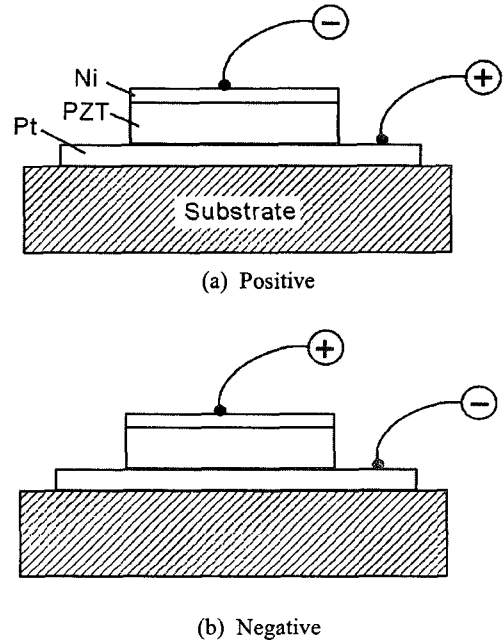


Fig. 7 External electrical field directions for the detectors

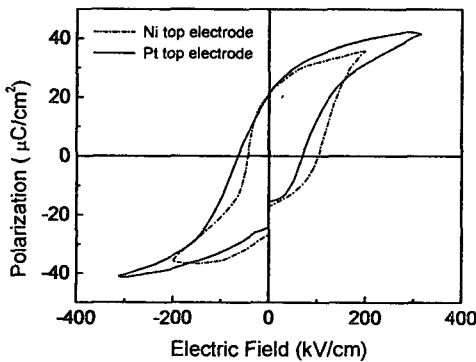


Fig. 6 P-E hysteresis loops of PZT thin films with Ni or Pt top electrodes

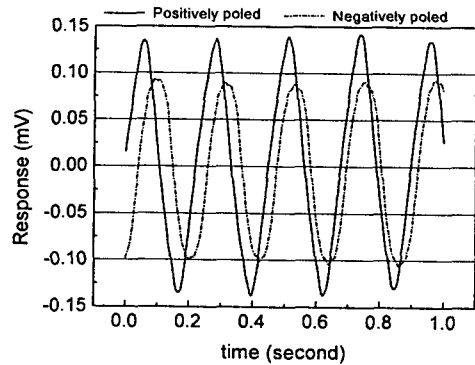


Fig. 8 Pyroelectric responses of Ni/PZT/Pt detectors, which were respectively prepoled positively or negatively

이 크게 달라지므로 적외선 감지소자의 설계에서 부터 이러한 특성을 반드시 고려해야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

PZT 박막 적외선 감지소자의 적외선 흡수층으로 적합한 니켈의 광학 및 전기적 특성을 이론적인 해석 및 실험을 통하여 분석하였다.

632nm 파장의 빛이 입사되는 경우, PZT(550nm)/Pt(100nm)/Ti(50nm)/Si₃N₄(200nm)/SiO₂(500nm)/Si 적층 위에 증착될 니켈 흡수층의 흡수율과 저항을 모두 고려한 이론적인 최적두께는 10nm 이었으며, 이 때의 흡수율은 80% 이었다. 10nm의 니켈 흡수층은 특히 4 μ m 근방의 파장영역에서 70% 정도의 뛰어난 흡수율을 보였는데, 이러한 니켈층은 공기의 창에 해당하는 중파장대의 적외선 소자의 성능을 높이는데 크게 기여할 수 있다.

통상적으로 쓰이는 다공질의 검은색 흡수층에 비해, 증착된 니켈층은 100배 이하의 두께를 가짐으로써 자체 열질량을 크게 줄일 수 있다. 이로써 불필요한 열손실이 줄어들게 되어, 적외선 감지소자의 성능이 향상된다. 또한 니켈은 흡수층 뿐만 아니라 윗전극으로도 사용할 수 있기 때문에, 윗전극 제작을 위한 추가적인 공정이 필요없으므로 전체공정에 들어가는 시간과 비용을 크게 줄일 수 있다.

후 기

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비(과제번호: 20030274)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lang, W., Kuhl, K. and Sandmaier, H., 1992, "Absorbing Layers for Thermal Infrared Detectors," *Sensors and Actuators A*, Vol. 34, pp. 243~248.
- (2) Blevin, W. R. and Geist, J., 1974, "Influence of Black Coatings on Pyroelectric Detectors," *Appl. Optics*, Vol. 13, No. 5, pp. 1171~1178.
- (3) Bly, V. T. and Cox, J. T., 1994, "Infrared Absorber for Ferroelectric Detectors," *Appl. Optics*, Vol. 33, No. 1, pp. 26~30.
- (4) Lienhard, D., Heepmann, F. and Ploss, B., 1995, "Thin Nickel Films as Absorbers in Pyroelectric Sensor Arrays," *Microelectronic Engineering*, Vol. 29, pp. 101~104.
- (5) Jong Soo Ko, Weiguo Liu, and Weiguang Zhu, 2001, "Performance Evaluation of Thin Film PZT IR Detectors in Terms of Silicon Substrate Thickness," *IEEK*, Vol. 38, No. 11, pp. 17~26.
- (6) Jong Soo Ko and Byung Man Kwak, 2002, "Pyroelectric Performance Evaluation of Pure PZT and Alternately Deposited PZT/PT Thin Films," *Trans. of the KSME A*, Vol. 26, No. 6, pp. 1001~1007.
- (7) Jong Soo Ko, Byung Man Kwak, Weiguo Liu, and Weiguang Zhu, 2002, "Substrate Effects on the Response of PZT Infrared Detectors," *Trans. of the KSME A*, Vol. 26, No. 3, pp. 428~435.
- (8) Lienhard, D., Heepmann, F. and Ploss, B., 1995, "Thin Nickel Films as Absorbers in Pyroelectric Sensor Arrays," *Microelectronic Engineering*, Vol. 29, pp. 101~104.