열영상 구현을 위한 마이크로볼로메타

(Micro Bolometer for Thermal Imaging)

▌문성욱, 김근태 / 한국과학기술연구원 마이크로시스템연구센터

서 론

적외선 영상 구현을 위한 노력은 19세기말에 적외선의 발견 이후로 꾸준히 연구되어 왔으며, 세계대전과 수차례의 국지전등과 같은 전쟁을 거치면서 군사용 목적으로 발전이 가속되어 왔다. 현재는 군사적 응용 이외에도 민간에서의 산업용, 의료용의 검사, 감시, 진단 등을 목적으로 적외선 영상의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 적외선 영상 연구는 현재까지 약 100 여년 동안 지속적으로 많은 연구비와 인력을 투자하여 진행되어왔으며 그 결과로써 우수한 화질의 열상 장비가 상용화되었다. 그림 1은 적외선 영역에서의 영상과 가시광 영역에서의 영상을 비교하고 있다.

적외선 영상 시스템에 적용되는 적외선 감지소자는 크게 적외선 감지 방식에 따라서 두 가지 형태로 구분된다. 즉 열형 감지소자(theraml detector)와 양자형 감지소자(photon detector)로 구분되며 전자인 열형 감지소자는 입사되는 적외선의 복사에너지에 따라 감지층 재료의 온도가 변화하고 이에 따른 물리량의 변화를 전기적 신호로 변환하여 감지하는 방식이다. 후자인 양자형 감지소자는 적외선 흡수에 의해 잉여 전자나 정공을 생성하여 전도율 혹은 광전류가 변화하는 현상을 이용하는 방식으로 적외선 영역의 파장에 대응하는 작은 밴드 갭을 가지는 물질을 응용하여 적외선을 감지하는 것이다.

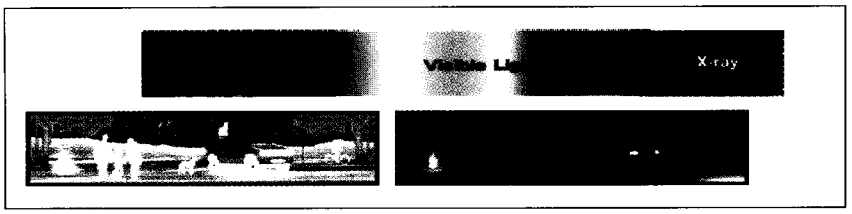


그림 1. 적외선 영역과 가시광 영역에서의 영상 비교

가. 양자형 적외선 검출기 (냉각형)

양자형 적외선 검출기는 1917년 T.W Case가 적외선 영역에서 사용할 수 있는 TIS를 사용하여 최초의 광검출기를 개발한 이래 독일에서 PbS 검출기(1940년초)를 개발하였고, 그 후 중 적외선 영역에서의 이용이 가능한 PbSe, PbTe, PbS등의 물질을 사용한 검출기(1940후반-1950년대 초)가 이어서 개발되었다. 또 1950년대 말에는 III-V, IV-VI 및 II-VI족 반도체 화합물들이 적외선 검출기의 재료로서 개발되기 시작하였다. 현재 많이 이용되고 있는 적외선 검출기의 재료로서 대표적인 예는 MCT(HgCdTe), PtSi, InSb를 들 수 있다. 이중 PtSi, InSb는 민수용 열상 카메라에 광범위하게 사용되고 있고, HgCdTe는 군용 장비에 많이 이용되고 있다. 특히 HgCdTe의 경우 큰 밴드 갭 에너지를 갖는 CdTe(1.6eV)와 0 의 밴드 갭 에너지를 갖는 HgTe의 조성비를 조절하여 적절한 밴드 갭 에너지를 갖게 할 수 있어 다양한 파장대역에서의 이용이 가능하게 되었다. 이와 같

은 광자형 감지 소자는 주사방식이 아닌 staring-type의 FPA로 제작되어 영상 검출기로 사용되고 있으며, 1978년 32 32 배열크기로부터 현재까지 최대 1024 1024 배열 크기까지 확장되었고 앞으로 HDTV의 화소 수준까지 발전할 전망이다. 그러나 광자형 검출기의 단점으로는 특정 파장 대역에서 감도가 있는 파장 의존성이 있으며, 빠른 응답속도(1μs이하)와 높은 감지능력(D* =1010~1012 cmHz1/2/W)에도 불구하고 잡음의 영향을 감소시키기 위해서 반드시 저온 동작을 시켜야 한다는 단점이 있다. 즉 냉각제나 전자 냉동소자 등으로 냉각이 필요하기 때문에 장비가 대형이고 고가가 될 수밖에 없으므로, 소형화에 문제가 있다.

나. 열형 적외선 검출기 (비냉각형)

최근에는 적외선 검출기를 응용하는 산업용, 의료용 등의 민수용 적외선 영상 시장이 활성화되어 소형이며, 저가의 적외선 영상 장비의 수요가 증가하였으며, 이에 대한 노력으로 비냉각 방식의 열형 적외선 검출기에 대한 연구가 촉진되었다. 현재는 우수한 성능의 소형 적외선 카메라가 상용화되었으며, 특히 마이크로 머시닝 기술의 발전에 힘입어 보다 우수한 성능을 가지는 비냉각형 열상 장비가 계속하여 개발되고 있는 추세이다. 열형 적외선 검출기는 광자형에 비하여 응답속도가 느리고 감도가 상대적으로 낮아서 개발 초기에는 주로 화재 및 침입자의 탐지, 온도계 등의 비영상 시스템에 많이 이용되었다. 그러나 1980년대 후반부터 실리콘 집적회로 제조 기술의 발달로 볼로미터, 초전센서, 그리고 열전센서가 실리콘 판독회로와 결합된 열형 적외선 센서가 상용화되기 시작되었다. 최근에는 어래이 제작 기술의 발전으로 상온에서 영상 획득이 가능하여 냉각장치가 필요 없는 소형 경량화된 휴대용 비냉각 열상장비(Uncooled thermal imager)가 개발되었으며 소자 배열도 80,000 소자 수준 이상으로 증가 되어 생산되고 있다. 지금까지 개발되고 있는 비냉각 열형 적외선 감지소자의 종류로는 볼로미터, 초전형 적외선 센서, 열전대형 적외선 센서가 대표적인 것이며, 따라서 현재까지 진행되어 온 연구동향에 대해서 알아보고자 한다. [1],[2],[3],[4],[5]

본 론

열형 적외선 감지소자의 종류

가. 마이크로 볼로미터

볼로미터는 적외선이 감지소자에 입사 시 발생하는 소자의 온도변화에 따른 저항변화를 측정하는 원리인데 다른 적외선 감지소자에 비해 chopper가 사용되지 않으며 적외선 감지도(detectivity) 및 응답도(responsivity)가 비교적 우수하며 monolithic한 제조공정을 할 수 있다는 장점에서 비냉각 적외선 감지 소자의 표준으로 사용되고 있다. 특히 최근에 주목받고 있는 MEMS(microelectromechanical system)기술은 소형화된 마이크로 볼로미터와 Si ROIC를 결합시켜 성능이 우수한 FPA의 상용화를 가능하게 하였다. 그러나 동작특성이 주위의 온도에 매우 민감하게 영향을 받기 때문에 항온 유지를 위한 TE 냉각기(thermoelectric cooler)를 별도로 부착하여 일정한 온도를 유지해야 하는 단점이 있다.

적외선 감지층의 저항체로는 현재까지 VOx가 대표적이지만 그 외 금속재료로 Ti, NiFe, 그리고 초전도체인 YBCO 등을 사용하기도 한다. 이와 같은 마이크로 볼로미터의 구조에서 감지층에 인가된 적외선 신호는 열전도 경로인 소자의 지지다리(supporting legs) 위에 형성된 금속선을 통하여 판독회로에 전달된다. 소자의 지지다리를 통한 열 손실의 최소화, 감지층의 성능지수인 TCR(temperature coefficient of resistance)값이 높은 재료의 선택, 그리고 소자 Noise의 최소화는 마이크로 볼로미터의 성능 향상을 위한 연구의 초점으로서 현재까지도 경쟁적으로 연구가 진행되고 있는 실정이다.

소자의 열질량과 열전도도에 의해서 결정되는 저항형 마이크로 볼로미터의 열 응답시간은 TV의 화면을 구성하는 frame rate를 충분히 확보할 수 있으며 어래이 형태로 제작하여 staring 방식의 영상 구현을 통하여 냉각형에 비하여 상대적인 단점인 응답시간 문제를 해결 할 수 있다. 또한 초전형 열상장비에 비하여 100Hz 또는 그 이상도 가능하기 때문에 잔상 현상을 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 그림 2는 Honeywell에서 개발한 마이크로 볼로미터의 모식도이다.

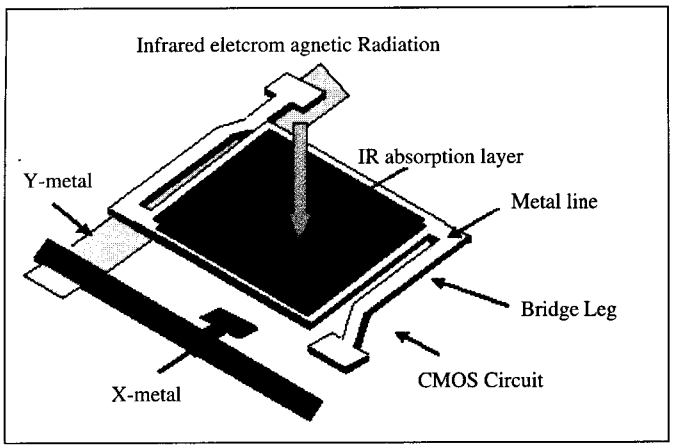


그림 2. Honeywell의 모식도

식으로 제작한 것이다. 즉 CMOS 회로를 주로 하여 구성된 실리콘 판독회로에 메사(mesa)구조를 형성하고 여기에 금속공정을 거쳐서 전극을 형성한다. 인듐 범프를 이용하여 실리콘 판독회로와 다른 기판에 제작된 BST 세라믹 화소(pixel)를 접합하여 열적 고립구조를 이루게 된다. 또한 단열 효과를 증대시키기 위하여 폴리이미드를 사용하여 메사 구조를 만들고 전극을 형성하기도 한다. 이와 같은 방식의 적외선 영상 센서는 제작 공정이 매우 복잡하고 쵸퍼를 사용한다는 단점을 가지고 있다.

나. 초전형 적외선 센서

초전형 적외선 센서는 동작 방식에 따라서 초전(pyroelectric) 효과, 즉 초전체로 이용되는 강유전체가 소자의 온도변화에 의하여 자발 분극(polarization)이 변화하는 것을 이용한 pyro형 감지소자와 전장이 인가되었을 때 자발 분극의 변화로 유전율의 변화를 전기신호로 변환하여 감지하는 dielectric bolometer형 감지소자가 있다. 초전 재료는 단결정 재료, 고분자 재료, 세라믹 재료 등이 있으며, 필요 조건으로서는 비열이 작고, 초전 계수가 크며 큐리 온도가 실온보다 높고 화학적으로 안정한 물질이어야 한다. 최근에 그 연구가 확대되고 있는 세라믹 재료는 상변이점인 큐리 온도부근에서 초전 효과가 증대되는 강유전체 물질로 pervoskite family라 불리는 세라믹 물질, 즉 BST(barium strontium titanate), PZT(lead zirconate titanate), PScT(lead scandium tantalate)등의 재료가 개발되어 적외선 영상 센서로 사용할 수 있게 되었다. 이들은 대부분 초점면 배열 방식을 채택하고 있으며 320 240 정도의 배열을 사용한 비냉각 적외선 영상장비가 상용화되어 있다.

그림 3은 TI사에서 개발한 초전형 적외선 센서인데 이는 실리콘 검출회로 기판과 BST 소자를 따로 제작하여 하이브리드 방

다. 열전대(thermopile) 소자

열전대형 소자는 그림 4에서처럼 두 도체의 접합 부분에 열을 가하면 양 끝단에서 전압이 유기되는 seebeck 현상을 이용한 소자로 주로 polysilicon/gold, silicon/Al, N-poly/P-poly, BiTe/BiSbTe와 같은 접합을 이용한다. 일반적인 열전대형 소자는 입사된 적외선이 금속과의 접합에서 접합부와 비접합부의 온도 차이에 의하여 기전력이 발생하는 원리를 이용한 것으로 마이크로머시닝 기술을 이용하여 실리콘 기판 위에 이방성 식각을 이용하여 멤브레인을 형성하고 그 위에 서로 다른 두 종류의 금속박막을 형성시켜서 소자를 제조한다. 이와 같은 열전대형 적외선 센서에 적외선이 입사되면 멤브레인의 온도가 올라가게 되어 hot junction이 이루어지고 실리콘 기판 쪽에서는 cold junction이

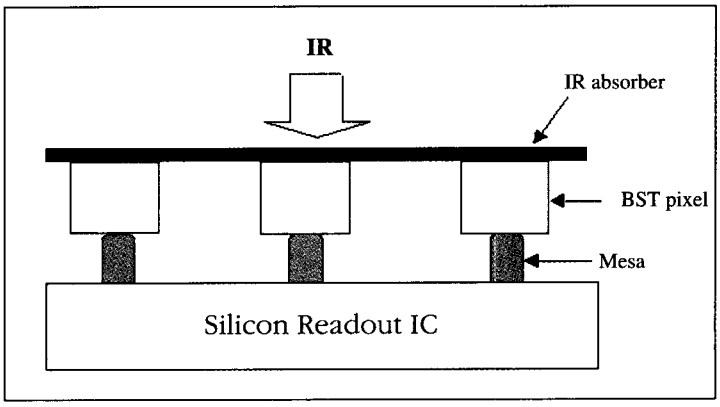


그림 3. TI사에서 개발한 초전형 적외선 센서

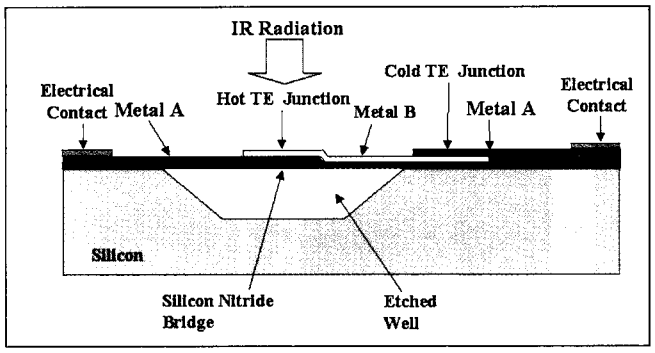


그림 4 열전대형 적외선 센서의 모식도

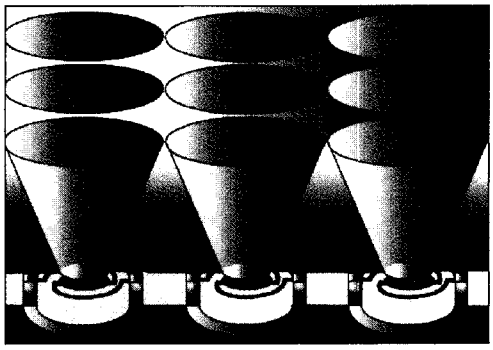


그림 5 3차원 안테나 결합 영상 감지소자의 모식도

형성되므로 기전력이 발생하며 그 변화를 이용하여 적외선을 검출하는 것이다. 현재는 감도를 높이기 위하여 한 셀에 여러개의 접합부를 형성하고, monolithic한 방법으로 제작된 열전대형 적외선 검출기가 개발되어 상용화되고 있으나 아직까지 영상시스템으로의 적용에는 감도와 소형화의 문제가 남아 있어 찾아 볼 수 없다. 열전대형 적외선 검출기는 응답도가 초전형 보다 떨어지고, 응답시간이 길다는 단점이 있으나 비교적 저온에서 고온까지 적외선 검출이 가능하다는 장점이 있다.

라. 안테나가 접합된 마이크로볼로미터

적외선 센서의 감지성능 향상을 위한 연구는 재료에서부터 소자 설계, 광학계, 판독 회로 개선 등의 여러 분야에서 활발하게 연구되어 왔다, 이러한 연구는 광자형이나 열형 감지소자에 공통적으로 적용되어 점진적인 성능 향상의 결과를 낳았다. 그러나 비 냉각 방식의 마이크로 볼로미터는 안테나를 접합할 수 있는 구조로서 다른 형태의 감지 소자에 비해서 성능향상에 큰 차별성을 부각시킬 수 있다. 현재까지 안테나 접합 방식의 마이크로 볼로미터는 2차원 즉 Bow-Tie 혹은 Spiral type의 형태로 적외선 감지층과 같은 표면 위에 제작되었으며 단 소자의 형태로 연구되어 왔다. 따라서 안테나를 이용하여 적외선 이미지 센서의 감지 성능을 향상시킨 연구는 극히 드물고 아직까지 상용화로 연결되지 못한 수준이며 주로 University of Texas (Austin), Berkeley 등의 대학에서 연구되고 있는 실정이다. 2차원 안테나를 결합하면 전체적인 소자의 크기가 증가함으로써 어레이 형태로 제조하는데 한계가 있다. 따라서 3차원 안테나를 결합함으로써 전체적인 소자의 크기를 줄여서 어레이로의 제작이 가능하며, 3차원 안테나의 우수한 지향성을 이용해서 어레이에서의 각 소자간의 잡음을 줄임으로써 감지도의 향상을 이룰 수 있다. 또한 소자의 크기를 줄임으로써 전체적인 소비 전력을 줄일 수 있으며 열질량이 작아지므로 열시정수(thermal time constant)값이 작아지게 되어 고속의 영상 감지 소자에 사용되어 질 수 있다. 그림 5는 3차원 안테나 결합 영상 감지소자의 모식도이다. [6],[7]

마이크로 볼로미터의 제작 공정

마이크로 볼로미터의 제작 방식에는 그림 6 (a)와 같은 bulk micromachining을 이용한 single level 방식과 그림 6 (b)와 같은 surface micromachining을 이용한 two level 방식이 있다. 이 가운데서 후자가 공정이 쉽고 열적 단열 구조의 제작에 더 효과적이어서 더 많은 응용이 되어 지고 있다. 그림 7은 Surface Micromachining을 이용한 마이크로 볼로미터의 제작 공정을 보여주고 있다. 폴리이미드를 희생층을 사용하며 SiNx를 구조층, VOx를 감지층으로 사용하게 된다. 마이크로 볼로미터의 기본적 형태는 50 50 μm, 두께 0.5 μm 의 SiNx 층이 약 2.5 μm의 거리를 두고 CMOS 집적회로를 갖는 실리콘 기판 위에 떠있는 2층 구조(floating structure)이다. 마이크로 볼로미터의 최적의 구조는 큰 fill factor, 높은 단열효과, 그리고 30-500Hz 프레임 속도에 응용되기 위한 빠른 온도-시간 상수 (thermal time constant, c/g)가 고려되어야 한다.

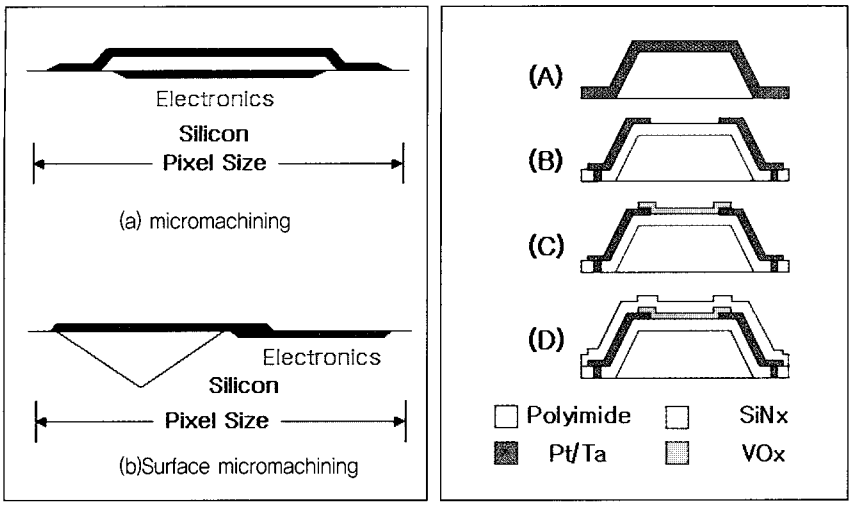


그림7. Surface micromachining 공정 순서

적외선을 감지하는 부분의 비율을 나타내는 것이다.

그림8은 마이크로볼로미터를 광학계와 영상 처리 시스템을 이용해서 실제 영상을 획득하는 방법을 보여주고 있다.

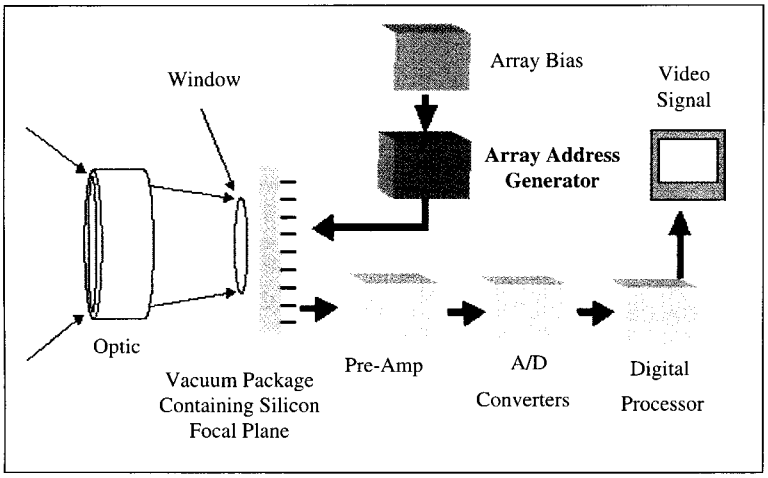
연구 동향

90년대 초 이후로 비냉각형 열 감지 소자들이 집중적으로 연구되기 시작되어 상품화 되었다. 대표적으로 미국의 Honeywell과 TI(Texas Instrument)의 마이크로머시닝된 적외선 감지소자가 있다. Honeywell사는 표면 미세 가공기술과 VOx 볼로미터 기술을 결합하여 감시장비, 조준경, 관측경 및 방공포용 적외선 탐지 및 추적장비용으로 사용되는 적외선 이메지 센서를 개발하였다. 또한 Texas Instrument 사에서는 초전 효과에 의하여 적외선을 감지하는 재료인 BST(Barium Strontium Titanate)를 이용한 dielectric bolometer type의 감지소자를 개발하였다. 이들 회사들의 표준화된 픽셀 수는 현재 320X240이다.

국내의 적외선 열상 시스템 관한 연구는 주로 광자형인 MCT 적외선 감지소자를 제작하고, 이를 2차원 어레이로 만드는데 주력하였으나, 현재까지는 상용화에 크게 성공하지는 못하였다. 연구 기관으로는 KIST, KAIST, ADD, 한국전자(주) 등이 MCT FPA 개발에 참여하였다. 또한 경북대학교에서는 InSb 재료를 이용한 센서를 개발 중이며, 삼성종합기술원에서 GaAs/InAs의 양자우물 구조를 이용한 적외선 감지소자 제작에 관한 연구를 수행하고 있다. 한국전자에서는 민군겸용 기술의 일환으로 1998년부터 BST를 적외선 흡수층으로 이용하고 Hybridization 방식을 이

마이크로 볼로미터의 특성 평가

마이크로볼로미터의 성능을 평가하는 것으로는 응답도(responsivity), 감지도(Detectivity), fill factor 등이 있다. 응답도는 입사한 광량에 대한 출력 신호의 변화 정도를 나타내며 감지도는 신호대 잡음비로부터 소자의 면적과 대역폭을 정량화해서 다른 소자와 비교 할 수 있도록 한 것이며, fill factor는 한 필셀에서 실제로



용한 비냉각 방식의 320 240 적외선 이미지 소자를 개발 중이며 대우전자(주)는 1999년부터 G-7 MEMS 과제에서 VOx 및 Ti을 적외선 흡수층으로 이용한 2차원 배열 방식의 적외선 이미지 시스템을 개발중이다. 또한 KIST에서는 21세기 프론티어 사업을 통해서 3차원 안테나를 결합한 마이크로 볼로미터에 관한 연구를 수행중이다. 서울대의 마이크로 시스템 센터에서는 thermopile 센서를 연구하고 있으며, LG 종합기술원 또한 가전제품과 온도 및 습도 제어장치에 적용되는 thermopile형 적외선 센서를 개발 중이다.

표 1. 볼로미터 성능 비교표

	IRsofradir	SBRC	Amber	Boeing	NEC
Type/Material	a-Si bolometer array	Si bolometer array	VOx bolometer array	VOx bolometer array	Titanium bolometer array
Array Size	320×240	320×240	320×240	320×240	128×128
Pixel Size Spectral	45μm pitch	48μm×48μm	50μm×50μm	51μm×51μm	50μm×50μm
Response	8-14μm	8-14μm	8-12μm	8-14μm	8-14μm
NETD	0.08K	0.05K	0.07K	0.1K	0.09K
Frame rate	25Hz	30Hz	30Hz	60Hz	30Hz
fill factor	80%			60%	59%
ROIC	CMOS	BICMOS	CMOS	CMOS	CMOS

표 1은 현재까지 외국에 발표된 여러 회사들의 볼로미터 특성을 비교한 것이다.

결 론

지금까지 적외선 영상 감지 소자의 여러 가지 형태와 특징에 대해서 살펴보았는데 고성능을 요구하는 군사용 목적으로 개발되고 있는 냉각 방식의 광자형 분야 그리고 아직 개발 초기에 있는 소형화와 민수용을 목적으로 하는 비냉각 방식을 채택한 저가의 열형 이미지 센서의 두 가지 큰 흐름으로 연구가 수행되고 있음을 알 수 있다. 특히 앞으로 민수용, 의료용으로의 많은 응용이 이루어 질 것으로 보이는데 따라서 작고 가격이 저렴한 마이크로 볼로미터가 많은 이용이 될 것으로 본다.

[참고 문헌]

[1]. Paul W. Kruse, "A comparison of the limits to the performance of thermal and photondetector imaging arrays", Infrared Phys. Technology, vol.36, pp.869-882, 1995.

[2]. Djuric, "New generation of thermal infrared detectors", International conference on micro-electronics, vol.2, pp.559-564, 1995.

[3]. E. Cole, "Monolithic Two-Dimensional Arrays of Micromachined Microstructures for Infrared Applications", Proceedings of the IEEE, vol.86, pp.1679-1686, 1998.

[4]. Paul W. Kruse, "Uncooled Infrared Focal Plane Arrays", Proceedings of the IEEE, pp.643-646, 1995.

[5]. I.A. Khrebtow, "Uncooled thermal IR detector arrays", J. Opt. Technology, vol.64, pp.511-519, 1997.

[6]. Gabriel M. Rebeiz, "Monolithic millimeter-wave two-dimensional horn imaging arrays", vol.38, pp.1473-1482, 1990.

[7] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory: analysis and design", p.695, 1997